

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PLAZMA ELEKTROLİTİK OKSİDASYON YÖNTEMİ İLE**  
**YÜZEYİ OKSİTLENEN ALÜMİNYUM KÖPÜK**  
**MALZEMELERE ALÜMİNYUMUN İNFİLTRASYONU İLE**  
**KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE MEKANİK**  
**ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**FATİH ÇAVUŞLU**  
**DOKTORA TEZİ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2021**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PLAZMA ELEKTROLİTİK OKSİDASYON**  
**YÖNTEMİ İLE YÜZEYİ OKSİTLENEN**  
**ALÜMİNYUM KÖPÜK MALZEMELERE**  
**ALÜMİNYUMUN İNFİLTRASYONU İLE**  
**KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE**  
**MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN**  
**İNCELENMESİ**

**FATİH ÇAVUŞLU**  
**DOKTORA TEZİ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**PROF. DR. METİN USTA**

**GEBZE**  
**2021**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**PRODUCTION AND INVESTIGATION OF  
MECHANICAL PROPERTIES OF  
COMPOSITE MATERIALS OBTAINED BY  
ALUMINUM INFILTRATED CERAMIC  
COATED ALUMINUM FOAMS THROUGH  
PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION  
PROCESS**

**FATİH ÇAVUŞLU**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF PHILOSOPHY**  
**DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR**  
**PROF.DR. METİN USTA**

**GEBZE**

**2021**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08/07/2021 tarih ve 2021/32 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 05/08/2021 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Fatih ÇAVUŞLU'nun tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Metin USTA

ÜYE : Prof. Dr. Ali ATA

ÜYE : Prof. Dr. Sakin ZEYTİN

ÜYE : Doç. Dr. Kemal KORKMAZ

ÜYE : Doç. Dr. Salih DURDU

**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

## ÖZET

Bu çalışmada açık gözenekli alüminyum alaşımı köpük yüzeyini PEO yöntemi ile seramik kaplamak ve elde edilen seramik kaplamalı köpük yapıya A383 alüminyum alaşımının vakum destekli basınçlı döküm yöntemiyle infiltrasyonu gerçekleştirilerek kompozit malzeme üretilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin makro yapı ve mikro yapı incelemesi, metal/seramik dönüşüm oranı hesaplaması, yoğunluk ölçümleri ve mekanik testler yapılmıştır.

PEO yöntemi ile alüminyum köpüklerin yüzeyinde seramik alümina ve mullit fazları oluşturulmuştur. PEO işlemlerinden sonra seramik kaplamalı köpük yapıların bağıl yoğunluğu artarken, gözenekliliği ise azalmıştır. Seramik kaplanan alüminyum alaşımı köpükler bir başlangıç doğrusal elastik (yarı-elastik deformasyon) bölge, genişletilmiş bir plato (durağan) bölgesi ve son olarak yoğunlaşma (sıkıştırma) bölgesini içeren, sünek metal köpük basma gerilme-gerinme eğrisine benzer bir eğri sergilemiştir. Üretilen kompozit levhaların ara kesit SEM ve mikro-CT tekniği ile tahribatsız incelemelerinde A383 alüminyum alaşımının tüm PEO ile seramik kaplanan gözenekli köpüklere başarılı olarak infiltre edildiği görülmüştür. Kompozit levhaların eğilme mukavemeti A383 alüminyum alaşımının eğilme mukavemeti ile karşılaştırıldığında düşük bulunmuştur. 15 J darbe enerjisinde tüm levhalarda geri sekme karakterli darbe davranışı gözlenmiştir. 45 J darbe enerjisinde ise 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 90 dakika kaplamalı kompozit levha ile 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 60 dakika kaplamalı kompozit levhada darbe ucunun kısmi nüfuz etme durumunun olduğu saptanmıştır. Darbe enerji düzeyi 140 J düzeyine artırıldığında, A383 alüminyum alaşımı levhada tam nüfuz etme durumu oluşarak delinme hasarı gerçekleşirken kompozit levhada delinme gerçekleşmeyerek daha iyi darbe direnci göstermiştir. Kompozit levhaların A383 alüminyum alaşımı levha ile karşılaştırıldığında aşınma direncini artmış ve ortalama aşınma hızı azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum Köpük, Plazma Elektrolitik Oksidasyon, Basınçlı İnfiltrasyon, Kompozit Malzeme, Darbe Testi, Eğme Testi, Enerji Soğurma.

## SUMMARY

In this study, it is aimed to coat the open porous aluminum alloy foam surface with PEO method and to produce composite material by infiltration of the A383 aluminum alloy to the ceramic coated foam structure by vacuum assisted pressure casting method and to examine its mechanical properties. Macrostructure and microstructure analysis of the produced PEO foams and composite materials, metal/ceramic conversion ratio calculation, density measurements and mechanical tests were carried out.

Ceramic alumina and mullite phases were formed on the surface of aluminum foams by the PEO method. While the relative density of the ceramic coated foam structures increased after PEO treatments, their porosity decreased. The ceramic coated aluminum alloy foams exhibited a curve similar to the compressive stress-strain curve of the ductile metal foam, including an initial linear elastic (semi-elastic deformation) region, an expanded plateau (stationary) region, and a final densification (compression) region. It was observed that the A383 aluminum alloy was successfully infiltrated into the porous foams coated with PEO by SEM cross-section and non-destructive micro-CT technique examinations of the produced composite plates. The flexural strength of the composite plates was found to be low when compared to the flexural strength of the A383 aluminum alloy. Rebound impact behavior was observed in all plates at 15 J impact energy. It was determined that partial penetration of the impact tip occurred in the 20 ppi pore density PEO coated for 90 minutes and 40 ppi pore density PEO coated for 60 minute composite plates at 45 J impact energy. When the impact energy level was increased to 140 J, full penetration and perforation damage occurred in the A383 aluminum alloy plate, while there was not any perforation at the composite plate and showed better impact resistance. The wear resistance of the composite plates is greater than A383 aluminum alloy plate and the average wear rate is lower than that of the A383 aluminum alloy plate.

**Keywords: Aluminum Foam, Plasma Electrolytic Oxidation, Pressure Infiltration, Composite Material, Impact Test, Bending Test, Energy Absorption.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimden itibaren kendisiyle çalıştığım, disiplini, üretme heyecanı ve arzusuyla beni cesaretlendiren, öğrencisi olmaktan büyük bir mutluluk ve onur duyduğum, Değerli Hocam ve Tez Danışmanım Prof. Dr. Metin USTA'ya her şey için gönülden teşekkür ederim.

Tez çalışmasının basınçlı döküm deneylerinin gerçekleştirilmesinde tüm kolaylıkları sağlayan, laboratuvarlarının kapılarını koşulsuzca açan, yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Ali KALKANLI'ya ve Doç. Dr. Murat KORU'ya yürekten teşekkür ederim. Tez çalışması sırasında Gebze Teknik Üniversitesi (Bilimsel Araştırma Projesini (GTÜ-BAP) birlikte yürüttüğümüz ve bilgi birikimiyle her zaman yardımcı olan Doç. Dr. Kemal KORKMAZ'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca tüm bilgi birikimlerini paylaşan ve daima yol gösterici olan Değerli Hocam Prof. Dr. Sakin ZEYTİN'e çok teşekkür ederim. Yüksek lisans ve doktora eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Işıl KUTBAY'a çok teşekkür ederim.

Tez sürecinde deneysel çalışmalarda desteklerini daima hissettiğim Dr. Salim Levent AKTUĞ'a ve tez yazma sürecinde görüşleriyle destekleyen Dr. Arman EHSANI'ye çok teşekkür ederim.

Tez çalışmasının test ve analizleri için GTÜ'nden Öğretim Görevlisi Ahmet NAZIM'a ve Teknisyen Âdem ŞEN'e; TÜBİTAK-MAM Malzeme Enstitüsü'nden Uzman Dr. Enver Bülent YALÇIN'a, Erdem GÜNGÖR'e teşekkür ederim.

TÜBİTAK'a BİDEB 2211-C Öncelikli Alanlar Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında aldığım destek için teşekkür ederim.

Gebze Teknik Üniversitesi'ne 2015-A-35 numaralı BAP kapsamında aldığım destekten dolayı teşekkür ederim.

Deneysel çalışmaların bir kısmında kullanmam için alüminyum köpük malzemeleri tedarik eden SEYKOÇ ALÜMİNYUM firmasına teşekkür ederim.

Bu çalışmanın her merhalesinde varlığını ve desteğini her daim gösteren; bana öğrettikleri, emekleri, sabırları ve saymadığım bütün her şey için aileme minnettarım.

# İÇİNDEKİLER

|                                                                               | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| ÖZET                                                                          | v                   |
| SUMMARY                                                                       | vi                  |
| TEŞEKKÜR                                                                      | vii                 |
| İÇİNDEKİLER                                                                   | viii                |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ                                                | xi                  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                                               | xii                 |
| TABLolar DİZİNİ                                                               | xvii                |
| <br>                                                                          |                     |
| 1. GİRİŞ                                                                      | 1                   |
| 2. METAL KÖPÜK MALZEMELER                                                     | 3                   |
| 2.1. Metal Köpük Malzemelerin Üretim Yöntemleri                               | 4                   |
| 2.1.1. Sıvı Metalden Açık Gözenekli Metal Köpük Üretim Yöntemleri             | 6                   |
| 2.1.1.1. Hassas Döküm                                                         | 6                   |
| 2.1.1.2. Boşluk Tutucu Malzemelerin Etrafına Döküm                            | 7                   |
| 2.1.2. Katı Metalden Açık Gözenekli Metal Köpük Üretim Yöntemleri             | 9                   |
| 2.1.3. Biriktirme Yöntemleri ile Açık Gözenekli Metal Köpük Üretim Yöntemleri | 10                  |
| 2.1.4. Kapalı Gözenekli Metal Köpük Üretim Yöntemleri                         | 11                  |
| 2.2. Metal Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri                             | 12                  |
| 2.2.1. Metal Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Ölçülmesi              | 14                  |
| 3. METAL KÖPÜK MALZEMELERİ KAPLAMA YÖNTEMLERİ                                 | 16                  |
| 3.1. Elektrobiriktirme                                                        | 16                  |
| 3.2. Anotlama                                                                 | 17                  |
| 3.3. Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO)                                     | 19                  |
| 4. İNFİLTRASYON YÖNTEMİ İLE KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ                          | 22                  |
| 4.1. Basıncsız İnfiltrasyon Yöntemi                                           | 22                  |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2. Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemi                                                                                        | 23 |
| 5. AĞIRLIK DÜŞÜRME DARBE TESTİ                                                                                            | 25 |
| 5.1. Düşük Hızlı Ağırlık Düşürme Darbe Testi                                                                              | 26 |
| 5.2. Düşük Hızlı Ağırlık Düşürme Darbe Testinde Hasar Analizi                                                             | 28 |
| 6. ÇALIŞMANIN AMACI                                                                                                       | 32 |
| 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR                                                                                                    | 33 |
| 7.1. Malzeme                                                                                                              | 33 |
| 7.2. Açık Gözenekli Alüminyum Köpük Malzemelerin PEO Yöntemi ile Seramik Kaplanması                                       | 35 |
| 7.3. Vakum Destekli Basınçlı Döküm Yöntemi ile Kompozit Levha Üretimi                                                     | 37 |
| 7.4. Mikroyapı İncelemesi                                                                                                 | 38 |
| 7.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemesi                                                                      | 38 |
| 7.4.2. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometre (EDS) İncelemesi                                                             | 39 |
| 7.4.3. X-ışınları Kırınımı (XRD) İncelemesi                                                                               | 39 |
| 7.4.4. X-ışını Mikro Bilgisayarlı Tomografi (mikro-CT) İncelemesi                                                         | 40 |
| 7.5. Metal/Seramik Dönüşüm Oranı Hesaplaması                                                                              | 40 |
| 7.6. Yoğunluk Ölçümü                                                                                                      | 41 |
| 7.7. Mekanik Testler                                                                                                      | 42 |
| 7.7.1. Basma Testi                                                                                                        | 42 |
| 7.7.2. Üç Nokta Eğme Testi                                                                                                | 43 |
| 7.7.3. Ağırlık Düşürme Darbe Testi                                                                                        | 45 |
| 7.7.4. Aşınma Testi                                                                                                       | 46 |
| 8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA                                                                                                   | 48 |
| 8.1. Makro Görüntü İnceleme Sonuçları                                                                                     | 48 |
| 8.1.1. PEO Yöntemi ile Üretilen Kaplamaların Makro Görüntü İnceleme Sonuçları                                             | 49 |
| 8.1.2. İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilen Kompozit Levhaların Makro Görüntü İnceleme sonuçları                             | 51 |
| 8.1.3. İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilen Kompozit levhaların Üç Nokta Eğme Testi Sonrası Makro Görüntü İnceleme Sonuçları | 52 |

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1.4. İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilen Kompozit Levhaların Ağırlık Düşürme Darbe Testi sonrası Makro Görüntü İnceleme Sonuçları | 53  |
| 8.2. Mikroyapı İnceleme Sonuçları                                                                                                 | 62  |
| 8.2.1. PEO Yöntemi ile Üretilen Kaplamaların Yüzey İncelemesi                                                                     | 63  |
| 8.2.2. PEO Yöntemi ile Üretilen Kaplamaların Ara kesit İncelemesi                                                                 | 66  |
| 8.2.3. PEO Yöntemi ile Üretilen Kaplamaların Kalınlığı                                                                            | 70  |
| 8.2.4. İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilen Kompozit Levhaların Ara Kesit İncelemesi                                                 | 72  |
| 8.2.5. Üç Nokta Eğme Testi Sonrası Kırık Yüzey inceleme                                                                           | 74  |
| 8.2.6. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Sonrası Yüzey İncelemesi                                                                       | 76  |
| 8.2.7. Kaplamaların SEM-EDS İncelemesi                                                                                            | 77  |
| 8.2.8. Kaplamaların XRD ile Faz Çözümlemesi                                                                                       | 82  |
| 8.2.9. X-ışını Mikro Bilgisayarlı Tomografi (mikro-CT) Sonuçları                                                                  | 87  |
| 8.3. Metal/Seramik Dönüşüm Oranları                                                                                               | 90  |
| 8.4. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları                                                                                                     | 92  |
| 8.5. Mekanik Test Sonuçları                                                                                                       | 95  |
| 8.5.1. Basma Test Sonuçları                                                                                                       | 95  |
| 8.5.2. Üç Nokta Eğme Test Sonuçları                                                                                               | 103 |
| 8.5.3. Ağırlık Düşürme Darbe Test Sonuçları                                                                                       | 105 |
| 8.5.4. Aşınma Test Sonuçları                                                                                                      | 119 |
| 9. SONUÇLAR                                                                                                                       | 121 |
| 10. ÖNERİLER                                                                                                                      | 124 |
| KAYNAKLAR                                                                                                                         | 125 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                                                                          | 131 |
| EKLER                                                                                                                             | 132 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler ve    Açıklamalar Kısaltmalar

|                |                                                                                                                              |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A              | : Başlangıç kesit alanı                                                                                                      |
| d              | : Yoğunluk                                                                                                                   |
| E*             | : Elastik modülü                                                                                                             |
| F <sub>b</sub> | : Basma kuvveti                                                                                                              |
| ρ              | : Özgül ağırlık                                                                                                              |
| P              | : Gözeneklilik                                                                                                               |
| pH             | : Etkili hidrojen iyonu yoğunluğunun eksi ondalıklı logaritması                                                              |
| ppi            | : Bir inç doğru üzerindeki gözenek sayısı                                                                                    |
| T6             | : Alüminyum alaşımlarında çözündürme ve takiben yapay yaşlandırma ısı işlemlerinin uygulandığını belirten bir numaralandırma |
| W <sub>v</sub> | : Birim hacim başına düşen soğurulan enerji                                                                                  |
| λ              | : Dalga boyu                                                                                                                 |
| σ <sub>b</sub> | : Basma gerilmesi                                                                                                            |
| BEI            | : Geri saçılan elektron görüntüleme                                                                                          |
| DO             | : Dönüşüm oranı                                                                                                              |
| EDS            | : Enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi                                                                                    |
| Mikro-CT       | : X-ışını mikro bilgisayarlı tomografi                                                                                       |
| PEO            | : Plazma elektrolitik oksidasyon                                                                                             |
| SEI            | : İkincil elektron görüntüleme                                                                                               |
| SEM            | : Taramalı elektron mikroskobu                                                                                               |
| XRD            | : X-ışını kırınımı                                                                                                           |

# ŞEKİLLER DİZİNİ

| <b><u>Sekil No:</u></b>                                                                                                                                                                                                    | <b><u>Sayfa</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1: Hücresel katıların yapısı.                                                                                                                                                                                            | 4                   |
| 2.2: Metal köpük malzemelerin üretim yöntemleri.                                                                                                                                                                           | 5                   |
| 2.3: Hassas döküm yöntemi ile köpük üretiminin şematik gösterimi.                                                                                                                                                          | 6                   |
| 2.4: Hassas döküm yöntemi ile üretilen ve %6 bağıl yoğunluğa sahip AA6101 alüminyum köpük yapısının SEM görüntüsü.                                                                                                         | 7                   |
| 2.5: Açık hücreli köpük üretimi için boşluk tutucu işleminin şematik gösterimi.                                                                                                                                            | 8                   |
| 2.6: Metal tozları ile boşluk tutma yönteminin şematik gösterimi.                                                                                                                                                          | 9                   |
| 2.7: Metal köpük malzemelerin basma davranışı.                                                                                                                                                                             | 12                  |
| 2.8: a) Açık hücreli köpüğün idealize edilmiş kübik modeli ve b) yük uygulandığında gözenek kenarı eğilmesi.                                                                                                               | 13                  |
| 2.9: Sünek malzemelerden yapılan köpüklerin hüce kenarlarının kalıcı eğilmesiyle çökmesi.                                                                                                                                  | 13                  |
| 2.10: Kırılgan bir köpüğün çökme mekanizması.                                                                                                                                                                              | 14                  |
| 3.1: Elektrobiriktirme sistemi.                                                                                                                                                                                            | 16                  |
| 3.2: Anotlama yöntemi hücresi.                                                                                                                                                                                             | 18                  |
| 3.3: PEO kaplama sistemi: (1) pencere, (2) karıştırıcı, (3) bağlantı kabloları, (4) gaz çıkış vantilatörü, (5) topraklanmış kasa, (6) güç ünitesi, (7) iş parçası, (8) soğutma sistemi, (9) banyo, (10) izolasyon plakası. | 19                  |
| 4.1: Basıncsız İnfiltrasyon yönteminin şematik gösterimi.                                                                                                                                                                  | 23                  |
| 4.2: Direkt sıkıştırılmalı döküm infiltrasyon yönteminin şematik gösterimi.                                                                                                                                                | 24                  |
| 5.1: Darbe test makinesinin şematik diyagramı.                                                                                                                                                                             | 27                  |
| 5.2: Kompozit levhaların kuvvet-yer değiştirme eğrileri.                                                                                                                                                                   | 28                  |
| 5.3: Düşük hızlı darbe altında bir sandviç kompozit malzemede deneysel olarak gözlemlenen hasar mekanizmaları.                                                                                                             | 29                  |
| 7.1: a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki alüminyum köpük malzemelerin makro görüntüleri.                                                                                                                      | 34                  |
| 7.2: PEO kaplama sistemi.                                                                                                                                                                                                  | 36                  |
| 7.3: Vakum destekli Basıncılı döküm yöntemiyle infiltrasyon işlemi.                                                                                                                                                        | 37                  |

|      |                                                                                                                                                                                                          |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.4: | Basma testlerinde kullanılan Instron AGS-X test cihazı.                                                                                                                                                  | 42 |
| 7.5: | Üç nokta eğme testlerinde kullanılan Instron marka AGS-X test cihazı.                                                                                                                                    | 44 |
| 7.6: | Instron 9250 HV darbe test cihazı.                                                                                                                                                                       | 45 |
| 7.7: | Darbe testlerinde kullanılan, 16mm çaplı yarı küresel darbe ucu.                                                                                                                                         | 45 |
| 7.8: | CSM Tribometer marka aşınma test cihazı.                                                                                                                                                                 | 47 |
| 7.9: | Veeco Dektak 8 marka profilometre cihazı.                                                                                                                                                                | 47 |
| 8.1: | 6101 alüminyum alaşımı köpük malzemenin a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarına ait makro görüntüleri.                                                                                             | 48 |
| 8.2: | 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemenin a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarına ait makro görüntüleri.                                                                                             | 49 |
| 8.3: | 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemelerin a) 30 dakika, b) 60 dakika ve c) 90 dakika PEO işlemi sonrası görüntüleri.                                                       | 50 |
| 8.4: | 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemelerin a) 30 dakika, b) 60 dakika ve c) 90 dakika PEO işlemi sonrası görüntüleri.                                                       | 50 |
| 8.5: | 20 ppi için a) 30 dakika, b) 60 dakika ve c) 90 dakika PEO işlemi sonrası vakum destekli basınçlı döküm yöntemi ile üretilen kompozit levhaların görüntüleri.                                            | 51 |
| 8.6: | 40 ppi için a) 30 dakika, b) 60 dakika ve c) 90 dakika PEO işlemi sonrası vakum destekli basınçlı döküm yöntemi ile üretilen kompozit levhaların görüntüleri.                                            | 51 |
| 8.7: | a) A383 alüminyum alaşımı levha ve b) 90 dakika PEO işlemi sonrası vakum destekli basınçlı döküm yöntemi ile üretilen kompozit levhanın eğme kırık yüzeyi makro görüntüleri.                             | 53 |
| 8.8: | A383 alüminyum alaşımı levhalara uygulanan a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri sonrası ön ve arka makro görüntüleri.                                                                                     | 54 |
| 8.9: | 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 15 J darbe enerjisi uygulaması sonrası a) 30 dakika, b) 60 dakika c) 90 dakika kaplama sürelerinde ön ve arka yüz makro görüntüleri. | 55 |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.10: | 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 45 J darbe enerjisi uygulaması sonrası a) 30 dakika, b) 60 dakika c) 90 dakika kaplama sürelerinde ön ve arka yüz makro görüntüleri.                                                        | 56 |
| 8.11: | 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 15 J darbe enerjisi uygulaması sonrası a) 30 dakika, b) 60 dakika c) 90 dakika kaplama sürelerinde ön ve arka yüz makro görüntüleri.                                                        | 58 |
| 8.12: | 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 45 J darbe enerjisi uygulaması sonrası a) 30 dakika, b) 60 dakika c) 90 dakika kaplama sürelerinde ön ve arka yüz makro görüntüleri.                                                        | 59 |
| 8.13: | A383 alüminyum alaşımı levhalara uygulanan a) 120 J ve b) 140 J darbe enerjileri sonrası ön ve arka yüz makro görüntüleri.                                                                                                                                      | 60 |
| 8.14: | 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan 90 dakika kaplama süresinde üretilen kompozit levhaların a) 120 J ve b) 140 J darbe enerjileri sonrası ön ve arka yüz makro görüntüleri.                                                                                 | 61 |
| 8.15: | 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde 90 dakika sürede üretilen kaplamaların 20 ppi için a) kiriş ağ yapısı, b) kiriş yüzeyi ve 40 ppi için c) kiriş ağ yapısı, d) kiriş yüzeyi SEM görüntüleri.                                                          | 62 |
| 8.16: | 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde, farklı sürelerde PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların yüzey yapıları: a-b) 30 dakika, c-d) 60 dakika, e-f) 90 dakika.                                                                | 64 |
| 8.17: | 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde, farklı sürelerde PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların yüzey yapıları: a-b) 30 dakika, c-d) 60 dakika, e-f) 90 dakika.                                                                | 65 |
| 8.18: | 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde, 20 ppi gözenek yoğunluğu için; a) 30 dakika, d) 60 dakika ve c) 90 dakika ile 40 ppi gözenek yoğunluğu için; b) 30 dakika, d) 60 dakika, f) 90 dakika sürelerinde üretilen kaplamaların ara kesit SEM görüntüleri. | 68 |
| 8.19: | 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde, 20 ppi gözenek yoğunluğu için; a) 30 dakika, d) 60 dakika ve c) 90 dakika ile 40 ppi                                                                                                                               | 69 |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|       | gözenek yoğunluğu için; b) 30 dakika, d) 60 dakika, f) 90 dakika sürelerde üretilen kaplamaların ara kesit SEM görüntüleri.                                                                                                                                               |    |
| 8.20: | PEO yöntemiyle 6101-T6 alaşımı köpük yüzeyinde üretilen kaplamaların ortalama kalınlıklarının kaplama süresi ile değişimi.                                                                                                                                                | 71 |
| 8.21: | PEO yöntemiyle 6061 alaşımı köpük yüzeyinde üretilen kaplamaların ortalama kalınlıklarının kaplama süresi ile değişimi.                                                                                                                                                   | 71 |
| 8.22: | Vakum destekli basınçlı döküm ile üretilen kompozit levhaların ara kesit yapısına ait 20 ppi gözenek yoğunluğu için; a) 30 dakika, d) 60 dakika ve c) 90 dakika ile 40 ppi gözenek yoğunluğu için; b) 30 dakika, d) 60 dakika, f) 90 dakika süreler için SEM görüntüleri. | 73 |
| 8.23: | 20 ppi gözenek yoğunluğu için; a) 30 dakika, d) 60 dakika ve c) 90 dakika ile 40 ppi gözenek yoğunluğu için; b) 30 dakika, d) 60 dakika, f) 90 dakika süreler için kompozit levhaların üç nokta eğme testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri.                           | 75 |
| 8.24: | 45 J darbe enerjisi sonrasında kompozit levhanın a) ön ve b) arka yüzlerinde oluşan çatlakların SEM görüntüleri.                                                                                                                                                          | 76 |
| 8.25: | a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alüminyum alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika sürede PEO yöntemiyle üretilen kaplamanın yüzey SEM fotoğrafı.                                                                                                             | 77 |
| 8.26: | a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika sürede PEO yöntemiyle üretilen kaplamanın yüzey SEM fotoğrafı.                                                                                                             | 78 |
| 8.27: | 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde 20 ppi için a) 30 dakika, b) 60 dakika, c) 90 dakika süreler ile 40 ppi için d) 30 dakika, e) 60 dakika ve f) 90 dakika sürelerde PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların kesit alan EDS çizgi analizleri.                       | 80 |
| 8.28: | 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde 20 ppi için a) 30 dakika, b) 60 dakika, c) 90 dakika süreler ile 40 ppi için d) 30 dakika, e) 60 dakika ve f) 90 dakika sürelerde PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların kesit alan EDS çizgi analizleri.                       | 81 |
| 8.29: | 6101 alüminyum alaşımı köpük yüzeylerinde üretilen PEO kaplamaların a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunlukları için XRD sonuçları.                                                                                                                                       | 83 |

|       |                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.30: | 6061 alüminyum alaşımı köpük yüzeylerinde üretilen PEO kaplamaların a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunlukları için XRD sonuçları.                                                                             | 84  |
| 8.31: | a) 20 ppi gözenek yoğunluğundaki açık gözenekli alüminyum alaşımı köpüğün ve b) A383 alüminyum alaşımı levhanın mikro-CT ile elde edilen morfolojik yapı görüntüleri.                                           | 87  |
| 8.32: | 20 ppi için a)30 dakika, b) 60 dakika ve c) 90 dakika ile 40 ppi için d)30 dakika, e) 60 dakika ve f) 90 dakika PEO kaplama sürelerinden üretilen kompozit levhaların mikro-CT ile morfolojik yapı görüntüleri. | 89  |
| 8.33: | PEO işleminden sonra tartılarak a) 6101 alüminyum alaşımı ve b) 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemeler için hesaplanan dönüşüm oranlarının kaplama süresi ile değişimi.                                        | 91  |
| 8.34: | a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki kaplamasız ve PEO yöntemi ile 30, 60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde kaplanan 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin basma testi gerilme-gerinme eğrileri.         | 96  |
| 8.35: | a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki kaplamasız ve PEO yöntemi ile 30, 60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde kaplanan 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin basma testi gerilme-gerinme eğrileri.         | 100 |
| 8.36: | a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarından üretilen kompozit levhaların üç nokta eğme testi eğme dayanımı-uzama grafikleri.                                                                                | 104 |
| 8.37: | 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için yük-zaman grafikleri.                                                                              | 106 |
| 8.38: | 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için yük-yer değiştirme grafikleri.                                                                     | 109 |
| 8.39: | 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için enerji-zaman grafikleri.                                                                           | 111 |
| 8.40: | 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için yük-zaman grafikleri.                                                                              | 113 |

|       |                                                                                                                                             |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.41: | 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için yük-yer değiştirme grafikleri. | 114 |
| 8.42: | 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için enerji-zaman grafikleri.       | 115 |
| 8.43: | A383 alüminyum alaşımı levha ile kompozit levhaların 120 J ve 140 J darbe enerjileri için yük-zaman grafikleri.                             | 116 |
| 8.44: | A383 alüminyum alaşımı levha ile kompozit levhaların 120 J ve 140 J darbe enerjileri için yük-yer değiştirme grafikleri.                    | 117 |
| 8.45: | A383 alüminyum alaşımı levha ile kompozit levhaların 120 J ve 140 J darbe enerjileri için enerji-zaman grafikleri.                          | 118 |
| 8.46: | A383 alüminyum alaşımı ve üretilen kompozit levhaların a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki aşınma davranışı.                   | 120 |

## TABLÖLAR DİZİN

| <b><u>Tablo No:</u></b>                                                                                                                                 | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 7.1: 6101-T6 alaşımina ait kimyasal bileşim (%ağırlıkça).                                                                                               | 34                  |
| 7.2: 6061-T6 alaşımina ait kimyasal bileşim (%ağırlıkça).                                                                                               | 34                  |
| 7.3: A383 alüminyum alaşımina ait kimyasal bileşim (%ağırlıkça).                                                                                        | 35                  |
| 7.4: 6101-T6 alaşımında kullanılan kaplama değişkenleri.                                                                                                | 37                  |
| 7.5: 6061-T6 alaşımında kullanılan kaplama değişkenleri.                                                                                                | 37                  |
| 7.6: Darbe testlerinde kullanılan A383 alüminyum alaşımı ile kompozit levhaların numune bilgileri ve darbe enerji düzeyleri.                            | 46                  |
| 8.1: 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemelerin kaplama öncesi ve kaplandıktan sonra ölçülen gözenek boyutu ve giriş kalınlığı değerleri.                | 66                  |
| 8.2: 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika kaplama süresinde üretilen kaplama yüzeyinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça). | 77                  |
| 8.3: 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika kaplama süresinde üretilen kaplama yüzeyinin kimyasal bileşimi (%ağırlıkça).  | 78                  |
| 8.4: 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika kaplama süresinde üretilen kaplama yüzeyinin kimyasal bileşimi (%ağırlıkça).  | 79                  |
| 8.5: 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika kaplama süresinde üretilen kaplama yüzeyinin kimyasal bileşimi (%ağırlıkça).  | 79                  |
| 8.6: 6101 alaşımı köpük malzemelerin kaplamasız ve PEO sonrası yoğunluk değerleri.                                                                      | 93                  |
| 8.7: 6061 alaşımı köpük malzemelerin kaplamasız ve PEO sonrası yoğunluk değerleri.                                                                      | 93                  |
| 8.8: Üretilen kompozit levhaların ve A383 alaşımı levhanın özgül ağırlık ve yoğunluk değerleri.                                                         | 94                  |
| 8.9: Kaplamasız ve PEO yöntemi ile kaplanan 6101 alaşımı alüminyum köpüklerin ölçülen ve hesaplanan ortalama mekanik değerleri.                         | 97                  |

|       |                                                                                                                                                                |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.10: | Kaplamasız ve PEO yöntemi ile kaplanan 6061 alaşımı alüminyum köpüklerin ölçülen ve hesaplanan ortalama mekanik değerleri.                                     | 99  |
| 8.11: | A383 alüminyum alaşımı ve kompozit levhaların ortalama eğilme mukavemet değerleri.                                                                             | 104 |
| 8.12: | A383 alüminyum alaşımı levha ile 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 15 J ve 45 J darbe enerjileri için elde edilen veriler.   | 107 |
| 8.13: | A383 alüminyum alaşımı levha ile 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 15 J ve 45 J darbe enerjileri için elde edilen veriler.   | 112 |
| 8.14: | A383 alüminyum alaşımı levha ile 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 120 J ve 140 J darbe enerjileri için elde edilen veriler. | 117 |

# 1. GİRİŞ

Metal köpükler gözenekli yapıları nedeniyle iyi mekanik özellikler sergileyen ve hafif olan yeni bir malzeme grubunu oluşturmaktadır. İyi mekanik ve fiziksel özelliklerin birleşimi, metal köpüklerin yapısal ve işlevsel alanlarda muhtemel kullanımını artırmaktadır. Hafif metaller arasında, alüminyum düşük ergime sıcaklığı, kolay şekillendirilebilme ve yüksek özgül mukavemet özelliklerine sahip olması sebebiyle köpük üretiminde özellikle tercih edilmektedir. Otomotiv endüstrisi, havacılık ve askeri uygulamalarda kullanılan hafif malzemelerin (metal köpük, sandviç panel, katmanlı kompozit, metal ana fazlı kompozit) tercih edilmesindeki başlıca ana sebepler olarak maliyet etkinliği, yüksek mukavemet, yüksek eğilme dayanımı/ağırlık oranı, aşınma direnci ve enerji soğurma kabiliyetleri sayılabilmektedir. Ağırlık düşürme darbe testleri, dinamik mekanik özelliklerin elde edilmesi için yararlı olmaktadır. Enerji soğurma, kırılma tokluğu, hasar mekanizmaları ve çentik duyarlılığı gibi özellikler darbe testlerinden sağlanabilmektedir.

Bu nedenle, literatürde, alüminyum köpüklerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve iyileştirilmesine yönelik çok sayıda araştırma mevcuttur. Ancak, mevcut araştırmalar, alüminyum köpüğün özelliklerini etkileyen üretim yöntemlerinin iyileştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Diğer taraftan, son yıllarda, alüminyum köpüklerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yüzey kaplama işlemleri uygulanmaktadır. Literatürde, kütsel alüminyum metalinin kaplanması ile ilgili olarak çok sayıda çalışma bulunmasına karşın, alüminyum köpüklerin kaplanması ile ilgili olarak az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda alüminyum köpükler elektrokaplama, anotlama ve plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yöntemleri ile kaplanmıştır. Yapılan araştırmalar, kaplamanın alüminyum köpüklerin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, öncelikle, farklı gözenek yoğunluklarındaki alüminyum köpüklere PEO yöntemi ile seramik kaplanmıştır. PEO işleminden sonra alüminyum köpüklere, yenilik kapsamında, henüz literatürde araştırılmamış olan, alüminyumun basınçlı infiltrasyonu uygulanmıştır. Literatürde, magnezyum alaşımının yüksek basınçlı döküm yöntemi kullanılarak alüminyum köpüğe infiltrasyonu ile bir bisiklet parçasının üretimi bulunmaktadır. Ancak, üretilen parçanın ağırlığından kazanım elde edilmesine karşın, mekanik özelliklerinde azalma

olduğu tespit edilmiştir [Vicario et al., 2016]. Sıvı hal üretim tekniklerinden biri olan basınçlı döküm yöntemi, metal ana fazlı kompozit malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, metalin özelliklerini iyileştirmek ve aynı zamanda talaşlı işlem gerektirmeden nihai şekle yakın bir ürün elde etmek için erimiş metal yüksek basınç altında kalıba dökülerek katılaşması sağlanmaktadır [Niu et al., 2000]. Alüminyum ve magnezyum alaşımları düşük yoğunluk, iyi dökülebilirlik ve yüksek özgül mekanik özellikleri nedeniyle genellikle ana faz malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmanın amacı alüminyum köpük yüzeyinde PEO yöntemi ile oluşturulan seramik kaplamanın yüksek mukavemet ve rijitlik özellikleri ile alüminyum köpüğün düşük yoğunluk özelliğini tek bir malzeme yapısında geliştirmek ve aynı zamanda geliştirilen bu malzemeye alüminyum alaşımının infiltrasyonu ile daha iyi mekanik özelliklerin kazandırılmasını sağlamaktır. Üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi ve geliştirilmesi sağlanmıştır. Çalışmadan elde edilecek veriler neticesinde darbeye karşı dayanımı iyi bir zırh malzemesi üretiminin mümkün olabileceği görülmüştür.

Bu tez çalışması dokuz bölümden oluşmaktadır: Birinci bölüm, araştırmanın amaçlarını özetleyen kısa bir giriş ile başlamaktadır. İkinci bölümde, metal köpük malzemeler, bu malzemelerin üretimi ve mekanik özellikleri; üçüncü bölümde, Plazma Elektrolitik Oksidasyon işlemini içeren metal köpüklerin kaplanması; dördüncü bölümde, infiltrasyon yöntemi ile kompozit malzeme üretimi ve beşinci bölümde ağırlık düşürme darbe testi konu alanları hakkında bir literatür bilgisi sunulmaktadır. Altıncı bölümde, bu tez çalışmasının amacı verilmektedir. Yedinci bölümde, açık gözenekli alüminyum köpük numunelerinin PEO ile kaplama işlemi, vakum destekli basınçlı döküm yöntemiyle kompozit levha üretimi, mekanik testler (basma, üç nokta eğme, darbe ve aşınma) ve PEO kaplamalı köpük yapılar ile döküm kompozit levhaların deneysel mikro ve makroyapı inceleme yöntemleri detaylı olarak anlatılmaktadır. Sekinci bölümde, yedinci bölümde verilen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve sonuçların tartışılması birlikte sunulmaktadır. Mümkün olduğunda, literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırma yapılmaktadır. Sonuç olarak, dokuzuncu bölümde bu araştırmadan çıkarılan temel sonuçlar ve onuncu bölümde ise öneriler sunulmaktadır.

## 2. METAL KÖPÜK MALZEMELER

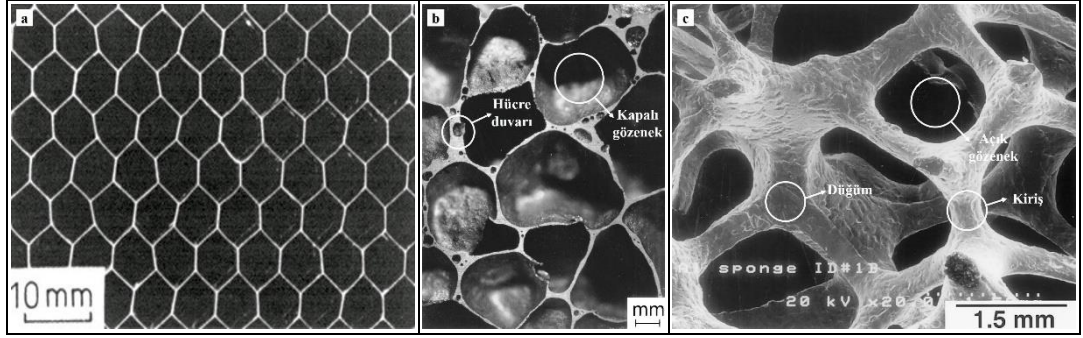
Metal köpük malzemeler gözenekli bir yapıya sahip oldukları için inşaat, darbe sönümlleme, yalıtım, gürültü ve titreşim azaltma, filtreleme ve diğer birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Gözenekli malzemelerin, yoğun muadillerine oranla çok düşük bir özgül ağırlığa sahip oldukları bilinmektedir. Bu nedenle, gözenekli malzemeler genellikle doğada odun ve kemik gibi yapı malzemeleri olarak doğal uygulamalarda ortaya çıkmaktadır. İnsan yapımı gözenekli malzemeler arasında, polimer köpük malzemeler şu anda sanayinin neredeyse tüm alanlarında yaygın uygulamalara sahiptir. 1960'lerden beri, gözenekli bir yapının özelliklerini metallerin benzersiz özellikleri ile birleştiren bir gözenekli metal malzeme elde etmek için çok sayıda araştırma yapılmıştır ve 1990'ların başından beri yüksek oranlarda devam etmektedir [Ashby and Gibson 1997].

Metal köpük malzemelerin gözenek yapısı hücreli bir katı olarak hücrelerin kenarlarını ve yüzlerini oluşturan birbirine bağlı katı kirişler veya gözenek duvarları ağından oluşmaktadır. Şekil 2.1'de hücreli katıların üç özgül yapısı gösterilmektedir. Bu yapılardan en basit olanı, arının altıgen hücrelerini andıran düzlemsel alanı doldurmak için paketlenen iki boyutlu çokgenler kümesidir (Şekil 2.1a). Bu nedenle, bu iki boyutlu hücreli katılara bal peteği denilmektedir. Daha yaygın olarak, bir uzaysal alanı doldurmak için üç boyutlu paketlenen hücreler çokyüzlüdür (Şekil 2.1b ve Şekil 2.1c) ve üç boyutlu hücreli katı yapılardan köpük üretilebilmektedir [Ashby and Gibson, 1997].

Köpük yapı bir gaz fazın bir sıvı ya da bir katı faz içerisinde homojen dağılması ile üretilmektedir. Gözeneklerde hapsedilmiş olarak bulunan gaz fazına ait kısımlar sıvı veya katı faz kısımları ile birbirinden ayrılmış veya bu faz kısımları tarafından kuşatılmışlardır. Gözenekler tamamen sıvı veya katı tarafından kuşatılmış ve dış ortama açık değilse hücreler birbirine bağlı değildir ve kapalı gözenekli köpük olarak adlandırılır. Gözenekler dış ortama açık veya birbirine bağlandığında, gazların veya akışkanların içinden akmasına izin verirse, köpük açık gözenekli olarak adlandırılır [Banhart, 2001].

Metalik köpük malzemeler dört yapısal eleman içermektedir. Bunlar gözenek, kiriş, düğüm ve gözenek duvarı olarak adlandırılmaktadır. Gözenek, metalik köpük hacminin boş veya herhangi bir gaz faz ile doldurulan hacmini; diğer üç yapısal eleman

ise gözenekli yapının hücresel bir katı olan metal hacmini temsil etmektedir. Köpük malzemenin metal kısımlarından kiriş ve düğüm açık gözenekli köpüklerde, gözenek duvarı ise kapalı gözenekli köpüklerde bulunmaktadır. Şekil 2.1b’de kapalı gözenekli alüminyum köpük malzemenin [Gibson, 2000] ve Şekil 2.1c’de açık gözenekli AA6101 alüminyum köpük malzemenin [Nieh et al., 2000] taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde gözenek, kiriş, düğüm ve gözenek duvarı görülmektedir.



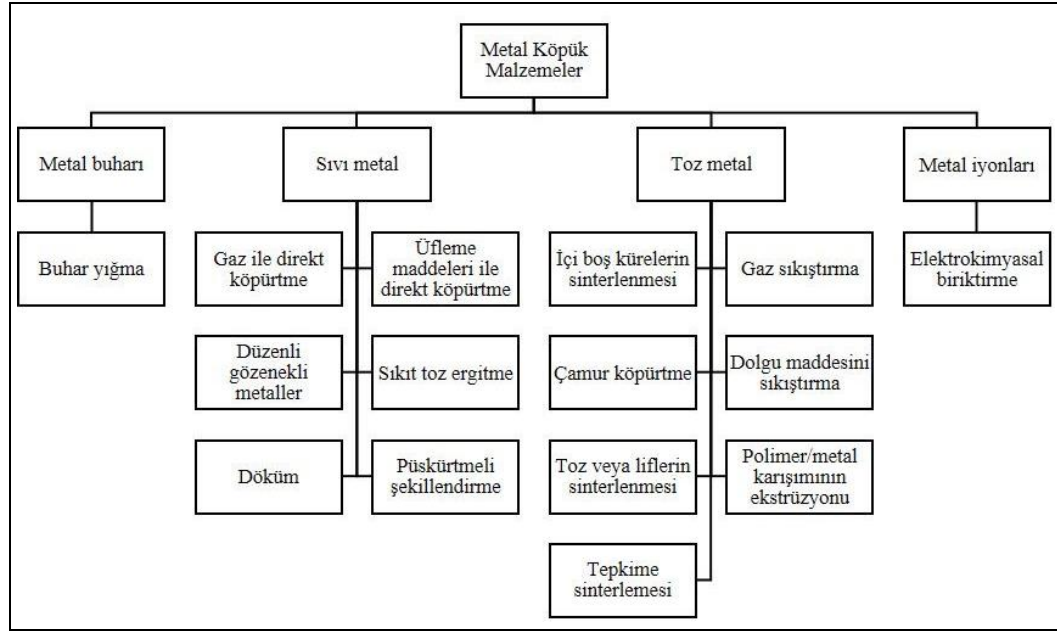
Şekil 2.1: Hücresel katıların yapısı.

## 2.1. Metal Köpük Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Metal köpük malzemelerin üretimine yönelik araştırmalar 1960'lardan beri devam etmektedir ve 1980'lerden bu yana artan yoğunlukta çalışmalar yapılmaktadır [Goodall, 2013]. Köpük üretim yöntemleri gözenekli hücresel bir katı yapı elde etmek için polimer, metal, seramik ve cam dâhil birçok farklı malzeme türüne uygulanmaktadır. Metaller arasında alüminyum metali köpük üretiminde yaygın olarak tercih edilmesine rağmen nikel, bakır, çinko, çelik ve metal esaslı kompozit malzemeler de kullanılmaktadır. Metalik köpük malzemeleri üretmek için birçok yöntem bulunmaktadır. Bazı yöntemler, sulu veya polimer sıvıları köpürtmek için kullanılan tekniklere benzerken, diğerleri metallerin sinterleme aktiviteleri veya elektriksel olarak biriktirilebilmeleri gibi karakteristik özelliklerinden yararlanılarak özel olarak tasarlanmaktadır [Banhart, 2001].

Metal köpük malzemelerin üretim yöntemleri metal malzemenin fiziksel durumuna göre sınıflandırılmaktadır [Ashby et al., 2000, Banhart, 2001, Davies and Zhen, 1983]. Şekil 2.2’de metal köpük malzemelerin üretim yöntemlerinin sınıflandırılması sıvı metal, toz metal, metal buharı ve metal iyonları olarak gösterilmektedir. Sözü edilen bu tekniklerin her biri, belirli bir gözenekli hücresel bir

katı yapıya, yani belirli bir gözenek şekline, gözenek boyutuna ve bağıl yoğunluklara sahip açık gözenekli veya kapalı gözenekli köpük üretmek için özel olarak kullanılmaktadır. Metal köpüğün özellikleri, metalin özelliklerine, bağıl yoğunluğuna ve gözenekli hücresel katı topolojisine (örneğin açık veya kapalı gözenek, gözenek boyutu, vb.) bağlıdır.



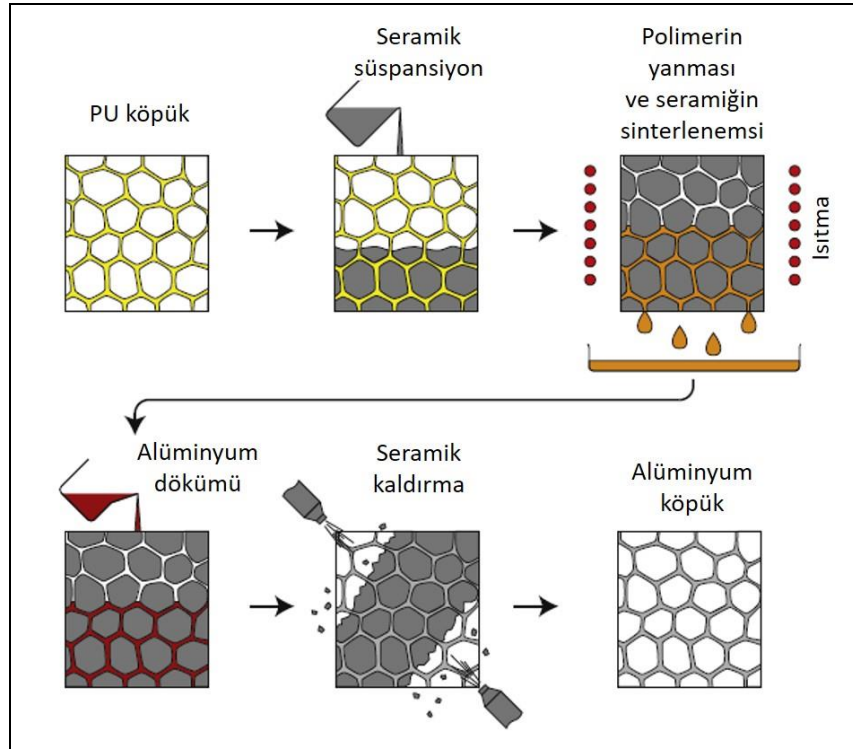
Şekil 2.2: Metal köpük malzemelerin üretim yöntemleri.

Metal köpük malzeme üretim yöntemleri olarak sıvı metalden açık gözenekli, katı metalden açık gözenekli, Elektro/Buhar biriktirme yöntemiyle ve toz metalden kapalı gözenek köpük metal üretim teknikleri uygulanmaktadır. Metal köpük malzemenin gözenek yapısını kontrol etmek ve farklı metallerden köpük üretebilmek için birçok araştırmacı ve üretici tarafından yeni teknikler geliştirilmektedir.

## 2.1.1. Sıvı Metalden Açık Gözenekli Metal Köpük Üretim Yöntemleri

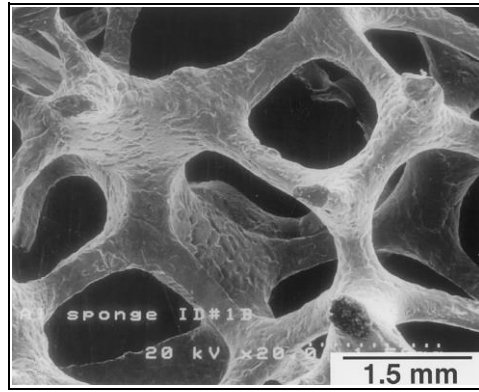
### 2.1.1.1. Hassas Döküm

Hassas döküm yöntemi, ön şekil olarak kullanılan açık gözenekli polimer esaslı bir köpük malzemeye ısıya dayanıklı sulu bir seramik çamurun emdirilmesi ile başlamaktadır. Isıya dayanıklı seramik çamur olarak mullit, fenolik reçine ve kalsiyum karbonat karışımı veya basit bir çamur karışımı kullanılabilir. Seramik çamurun kurutulmasından sonra, polimer köpük malzeme ısıl işlemle ayrıştırılarak gözenekli bir kalıp oluşturulması sağlanır. Erimiş metal gözenekli kalıba dökülerek ön şekil olarak kullanılan açık gözenekli polimer köpük malzeme yapısının benzer bir modeli oluşmaktadır. Metal köpük malzeme, kalıbın çıkarılmasından sonra (örneğin su spreyi ile) elde edilmektedir [Ashby and Gibson, 1997]. Şekil 2.3'te hassas döküm yöntemi ile üretilen köpük malzemenin üretim işlemi şematik olarak verilmektedir [Goodall and Mortensen, 2014].



Şekil 2.3: Hassas döküm yöntemi ile köpük üretiminin şematik gösterimi.

Şekil 2.4, bu yöntem ile üretilen açık gözenekli alüminyum metal köpük malzemenin bir mikroskopik resmini göstermektedir [Nieh et al., 2000]. Bu tür metal köpükler, ERG Materials and Aerospace Corporation, Oakland, California tarafından (ABD) uzun yıllardır "Duocel" ticari markası altında satılmaktadır [ERG Inc. Oakland, 2021]. Halihazırda, 5-40 ppi (bir inç uzunluğundaki gözenek sayısı) arasında değişen farklı gözenek boyutlarında (1-5 mm) Duocel köpükler üretilmektedir. Üretilen köpük yapısı ve yoğunluğu, polimer esaslı bir köpük malzeme ön şeklinin seçimi ile kontrol edilmektedir. Gözenek boyutu %80 ile %97 arasında değişen oranlarda ve genellikle 6101, 6061 veya AlSi<sub>7</sub>Mg (A356) gibi alüminyum alaşımları, bakır [ERG Inc. Oakland, 2021] ve magnezyum [Yamada et al., 2000] gibi diğer metaller de üretilebilmektedir. Bunun gibi düşük yoğunluklu köpükler, ısı değişim ortamı, çekirdek yapısal malzemeler ve susturucular gibi örneklerle farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Hassas döküm yöntemi ile üretilen metal köpük yapısının nispeten düşük erime noktasına sahip dökülebilir metaller ve alaşımlarla sınırlı olması ve köpük yapısına minimum hasar vererek kalıbın çıkarılması gerekliliği yöntemin dezavantajları olarak kabul edilebilmektedir [Ashby, 2006, Banhart, 2001].

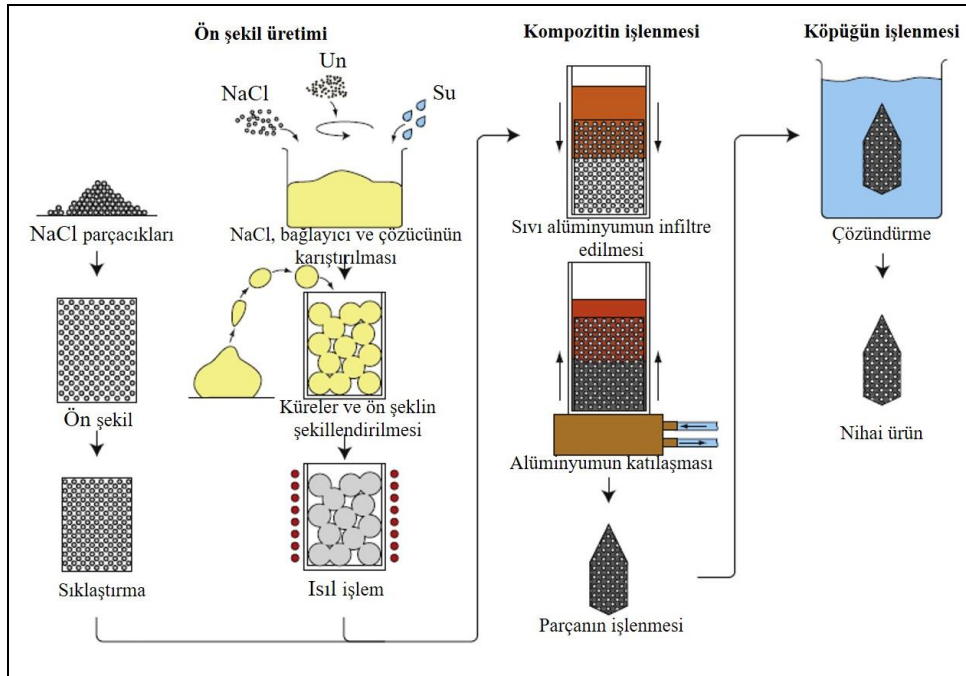


Şekil 2.4: Hassas döküm yöntemi ile üretilen ve %6 bağıl yoğunluğa sahip AA6101 alüminyum köpük yapısının SEM görüntüsü.

#### 2.1.1.2. Boşluk Tutucu Malzemelerin Etrafına Döküm

Köpük metaller, sıvı metalin inorganik ve organik granüllerin veya düşük yoğunluklu içi boş küreler etrafına dökülmesiyle veya bu tür malzemelerin bir metalik eriyik içine katılmasıyla üretilebilmektedir. Granüller, dökümden sonra metalik üründe kalarak "sentaktik köpük" olarak adlandırılan metal köpük yapısını

oluşturabilmekte veya uygun çözücüler veya asitler içinde çözündürülerek ya da ısıtılıp işlemle köpük yapısı kalacak şekilde ayrıştırılabilmektedir. Granüllerin ayrıştırılması boşluk tutan dolgu maddelerinin içeriği, tüm granüllerin birbirine temas ettiği kadar yüksek olduğunda başarılı bir şekilde yapılabilir. Şekil 2.5'te boşluk tutucu malzemelerin etrafına döküm yöntemi ile açık gözenekli köpük üretimi şematik olarak gösterilmektedir [Goodall and Mortensen, 2014]. Çözünür tuzlar [Han et al., 2004, Jinnapat and Kennedy, 2010, Pollien et al., 2005], içi boş alüminyum oksit küreler [Su et al., 2019] ve karbomit parçacıkları [Alizadeh and Mirzaei-Aliabadi, 2012, Jiang et al., 2007] inorganik dolgu malzemesi olarak kullanılan malzemelere örnek olarak verilebilmektedir.



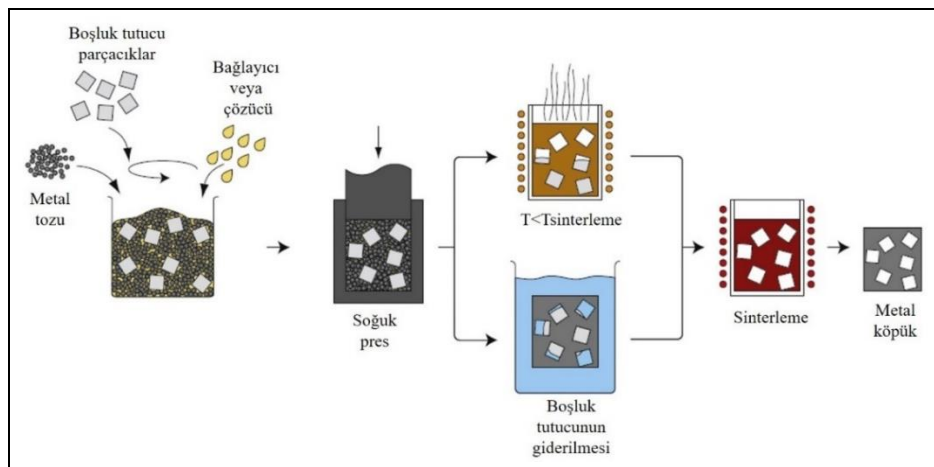
Şekil 2.5: Açık hücreli köpük üretimi için boşluk tutucu işleminin şematik gösterimi.

Genellikle eriyiğin erken katılaşmasını önlemek için boşluk tutucu kütlenin, ısı kapasitesi yüksek veya infiltrasyon basıncı düşük olduğunda, ön ısıtılması gerekmektedir. Sıvı metallerin yüksek yüzey gerilimi nedeniyle, granüllerin sıvı metal tarafından ıslatılması sorun olabilmektedir çünkü granüller arasındaki boşluklar tam olarak doldurulmayabilmektedir. Granüller arasında bir vakum oluşturmak veya eriyiğe basınç uygulamak infiltrasyon için önemli bir ön koşuldur. Boşluk tutan tuzlar suda çözündürülerek uzaklaştırılabilmektedir. Kum peletler bağlayıcının ısı etkisi altında ayrışmasıyla kolayca çıkarılabilirken, polimer küreler ısıtılıp bozundurma ile

çıkarılabilmektedir. Alüminyum, magnezyum, çinko, kurşun, kalay vb. dahil olmak üzere çok çeşitli metaller bu şekilde işleme tabi tutulabilmektedir. Bu yöntem ile istenilen geometride bir kalıp tasarlanarak önceden belirlenen bir şekle sahip parçalar üretilebilmektedir. Boşluk tutucuları kullanmanın avantajlarından biri, dolgu malzemesi granüllerinin parçacık boyutlarının dağılımı ile verilen gözenek boyutu dağılımının kontrolünün kolay olmasıdır. Boşluk tutucuların kullanımının dezavantajı ise elde edilebilecek maksimum gözeneklilik %80'in altındaki değerlerle sınırlı olmaktadır [Banhart, 2001].

### 2.1.2. Katı Metalden Açık Gözenekli Metal Köpük Üretim Yöntemleri

Metal köpüklerin üretimi için toz metalürjisi veya metal tozu ile çoğaltma olarak da adlandırılan sinterleme ve çözündürme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, boşluk tutucu ile üretilen metal köpüklerde olduğu üzere metal tozlarının belirli bir boşluk tutucu ile karıştırılması ve sıkıştırılmasına dayanmaktadır. Boşluk tutucu yönteminde olduğu gibi, farklı boşluk tutucu malzemeler kullanılabilir. Boşluk tutucu malzeme olarak genellikle alüminyum ve bakır köpüklerin üretiminde NaCl tuzu kullanılmaktadır [Wang et al., 2010, Zhao and Sun, 2001]. Karbomit granülleri, alüminyum [Bafti and Habibolahzadeh, 2010, Jiang et al., 2005] ve saf titanyum köpüklerin [Niu et al., 2009] üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da metal tozlarından boşluk tutma yöntemi ile açık gözenekli köpük üretiminin gösterimi şematik olarak verilmektedir [Goodall and Mortensen, 2014].



Şekil 2.6: Metal tozları ile boşluk tutma yönteminin şematik gösterimi.

Metal köpükler metal tozları, şişirme maddeleri ve bazı tepkin katkı maddelerinden oluşan bir bulamaç hazırlanarak da üretilmektedir. Bulamaç karıştırıldıktan sonra bir kalıba dökülmekte ve yüksek sıcaklıklarda tutulmaktadır. Katkı maddelerinin ve şişirme maddelerinin etkisi altında, bulamaç viskoz hale gelmekte ve gaz oluşumu başladığında genleşmeye başlamaktadır. Genleşen bulamacın kurutma işlemi ile sinterlenmesi sağlanarak kayda değer bir mukavemete sahip bir metal köpük elde edilmektedir. Köpükler, alüminyum tozlarından şişirme maddesi olarak alüminyum hidroksit veya hidroklorik asit ile ortofosforik asit kullanılarak üretilmektedir. Ayrıca, boşluk tutucu olarak organik bir polimerin bir bulamaca daldırılması ve bu şekilde kaplanan köpüğün kurutulmasından sonra polimerin yandığı ve metal tozu parçacıklarının sinterleme sıcaklığına kadar ısıtılması ile açık gözenekli metal yapı üretilmektedir [Zaman and Keles, 2014].

### **2.1.3. Biriktirme Yöntemleri ile Açık Gözenekli Metal Köpük Üretim Yöntemleri**

Metal köpük malzemelerin buharla biriktirme, kimyasal buhar biriktirme veya elektrobiriktirme yöntemleri ile üretimi bir ön şekil (örneğin polimer) yüzeyinde metalin buhar fazından indirgenmesi ya da çözünmesi, yoğunlaştırılması veya elektrolit içinden elektrik akımı geçirerek yığılması sağlanarak yapılmaktadır. Ön şekil kaplamadan sonra ısıtma işlemiyle çıkarılabilmekte ve köpük, ön şekil ile aynı şekilde, ancak içi boş kırımlar olarak üretilmektedir. Metal buharı ile biriktirme işleminde özellikle poliüretan köpük, üretilecek köpüğün şeklini tanımlayan bir ön şekil olarak kullanılabilir. Polimer köpük üzerinde elektrobiriktirme, polimer köpüğün bir miktar elektriksel olarak iletken olmasını gerektirmektedir. Bu, polimer köpüğün grafit veya karbon siyahı bazlı elektriksel olarak iletken bir bulamaç içine daldırılması, köpüğün akımsız bir kaplama çözeltisine daldırılması veya polimerin katot püskürtme yoluyla ince bir iletken tabaka ile kaplanması sağlanarak gerçekleştirilmektedir [Banhart, 2001].

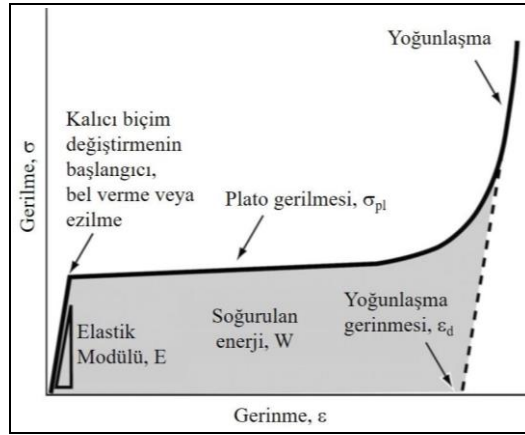
## 2.1.4. Kapalı Gözenekli Metal Köpük Üretim Yöntemleri

Kapalı gözenekli metal köpük malzemeler, metal köpük malzemelerin bir diğer morfolojik yapısal biçimini oluşturmaktadır ve bu çalışmanın kapsamı dışında olduğundan, üretilen yapılardaki farklılıkları göstermek için mevcut bazı üretim yöntemlerinin özeti verilmektedir. Kapalı gözenekli metal köpük malzemelerde gözenekler gözenek duvarı ile birbirinden ayrılmaktadır ve herhangi bir akışkanın gözeneklerden geçmesini engelleyerek sızdırmazlık sağlamaktadır. Bu nedenle hava kabarcıklarının metal içinde dağılması ve kapalı gözeneklerde hapsolması olarak düşünülebilmektedir. Bu şekilde bir yapı oluşturmak için uygulanan yöntemlerden birinde gazın (hava, argon veya nitrojen) erimiş metal veya alaşımlarına harici bir kaynaktan enjeksiyonunu içeren veya erimiş metale gaz salıveren köpürtme maddesi karıştırarak sıvı içinde gaz oluşumuna neden olan doğrudan köpürtme yöntemleri kullanılmaktadır. Gaz enjeksiyonundan önce, viskozitesini arttırmak için erimiş metale alüminyum oksit, magnezyum oksit veya silikon karbür gibi bileşikler eklenebilmektedir. Bu yöntem en eski köpük üretim yöntemlerinden biridir ve günümüzde Kanada'da Cymat Aluminium ile Norveç'te Hydro Aluminium şirketleri tarafından yüksek hacimlerde üretimi yapılmaktadır. Sıvı metali doğrudan köpürtmek için ikinci bir alternatif yol, içine gaz enjekte etmek yerine eriyiğe bir köpürtme maddesi eklemektir. Köpürtme maddesi, ısıнын etkisi altında ayrışmakta ve daha sonra köpürtme sürecini harekete geçiren gazı serbest bırakmaktadır [Ashby et al., 2000, Banhart, 2001].

Kapalı gözenekli metal köpük malzemelerin üretimi sıvı metalden doğrudan köpürtme yöntemlerinden başka katı hal metal tozu kullanılarak yapılmaktadır. Bu yöntemde metal tozları köpürtme maddesi olarak  $TiH_2$  ile sıkıştırılmaktadır. Daha sonra metalin erime noktasına ve köpürtme maddesinin bozunma noktasına yakın sıcaklıklarda ısııl işlem uygulanmaktadır. Hidrojen, köpürtme maddesi tarafından salıverilerek sıkıştırılmış olan karışımın şişerek genişlemesini sağlamaktadır. Bu yöntem ile alüminyum, çinko, demir ve kurşun köpük malzemelerin üretimi yapılmaktadır. Almanya'nın Bremen kentinde yer alan Fraunhofer Enstitüsü'nde geliştirilen bu yöntem başlangıç malzemesi olarak metal tozları kullanıldığı için genellikle "toz metalürjisi" olarak da adlandırılmaktadır [Ashby et al., 2000, Banhart, 2001].

## 2.2. Metal Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Metal köpük malzemeler basma yükü altında test edildiğinde, mekanik davranışları üç farklı deformasyon bölgesi tanımlanarak açıklanabilmektedir; köpük gözeneklerinin plastik olarak eğilmeye başladığı ilk elastik bölge, plato (düz) veya tam plastik deformasyon bölgesi ve son olarak yoğunlaşma bölgesi. Yoğunlaşma, köpük tamamen basma yükü altında sıkıştırıldığında meydana gelmektedir. [Ashby and Gibson, 1997]. Şekil 2.7’de köpükler için deformasyon bölgelerini içeren gerilme-gerinme grafiği gösterilmektedir [Ashby, 2006].

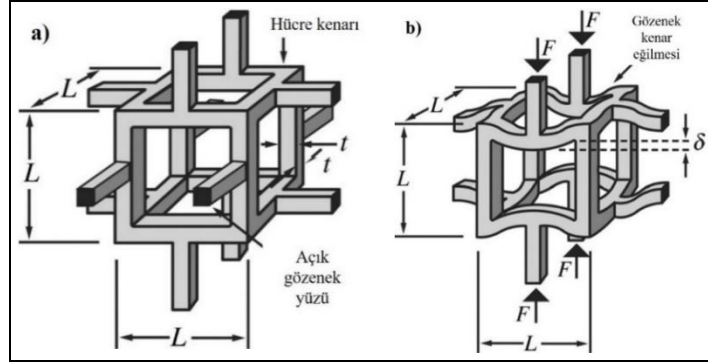


Şekil 2.7: Metal köpük malzemelerin basma davranışı.

Elastik bölgesi, başlangıçtaki doğrusal esnekliğin nispeten düşük gerilmelerde ve gerinmelerde meydana geldiği basma gerilmesi-gerinme eğrisinde gösterilmektedir. Köpük malzemelerin doğrusal elastik davranışı, Elastik modülü  $E^*$  ile karakterize edilmekte ve mekanizması, köpük malzemenin açık veya kapalı gözeneklere sahip olmasına bağlı olarak değişmektedir. Açık gözenekli köpük malzemenin elastik modülü, Şekil 2.8a’da gösterilen L uzunluğundaki elemanların kübik dizisi ve t kalınlığındaki gözenekleri oluşturan kenarların düzenli yapıları varsayılarak modellenmektedir. Bir yük uygulandığında, gözeneği oluşturan kenarlar Şekil 2.8b’de görüldüğü gibi bir yer değiştirme  $\delta$  ile eğilerek sarmaktadır. Bu modele göre Elastik modülü  $E^*$  aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır [Ashby, 2006].

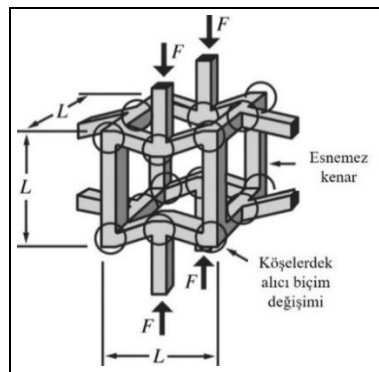
$$\frac{E^*}{E} = C_1 \left( \frac{\rho^*}{\rho} \right)^2 \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1’de  $E^*$  ve  $\rho^*$  köpüğün elastik modülü ve yoğunluğunu,  $E$  ve  $\rho$  ise köpüğün üretildiği malzemenin elastik modülü ve yoğunluğunu vermektedir.  $C_1$  sabiti, teorik olarak açık gözenekli köpükler için daha önceden bulunduğundan, normalde 1 olduğu varsayılmaktadır.

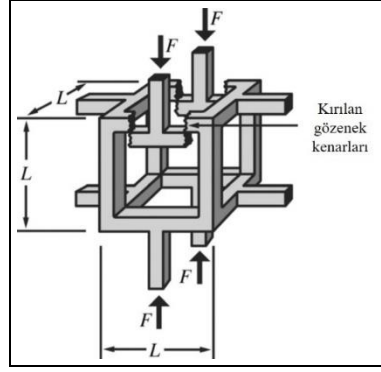


Şekil 2.8: a) Açık hücreli köpüğün idealize edilmiş kübik modeli ve b) yük uygulandığında gözenek kenarı eğilmesi.

Elastik bölgenin sonunda, gerilme, köpüğün basma mukavemeti olarak kabul edilen maksimum değere ulaşmakta ve yüklemenin sürdürülmesi üzerine köpüğün gözenek kenarları çökmeye başlamaktadır. Bu noktada artan gerilme ile gerilme artmamakta (veya çok az arttığı) ve plato bölgesi başlamaktadır. Basma yükü altında metal köpük gözenekleri Şekil 2.9’da gösterilen kirişlerde kalıcı biçim değiştirme oluşumuyla çökmektedir. Seramik köpük malzemelerde ise kırılma kırılma ile hasar gerçekleşmektedir (Şekil 2.10). Çökme yaklaşık olarak sabit bir gerilimde plato bölgesinde başlamaktadır ve bu bölge köpüklerin çarpma koruması ve enerji emilimi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır [Ashby, 2006].



Şekil 2.9: Sünek malzemelerden yapılan köpüklerin hücre kenarlarının kalıcı eğilmesiyle çökmesi.



Şekil 2.10: Kırılğan bir köpüğün çökme mekanizması.

### 2.2.1. Metal Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Ölçülmesi

Köpük malzemelerin mekanik özelliklerinden akma mukavemeti, elastik modülü ve ezilme sırasındaki enerji sönümleme kapasitesi ölçülen en yaygın özellikler olarak bilinmektedir. Güvenilir veriler elde etmek için metal köpük malzemelerin mekanik özelliklerinin ölçülmesinde büyük özen gösterilmesi önem arz etmektedir. Metal köpük malzemeler, üretim yönteminin karmaşıklığından kaynaklanan ve mekanik özelliklerinde azalmaya neden olan bazı yapısal kusurlara sahip olabilmektedir. Bu nedenle, deformasyon davranışlarını değerlendirmek için yapısal kusurları olmayan veya en az sayıda olan homojen yapılı metal köpükler tercih edilmektedir.

Metal köpük malzemelerin basma testinden önce gerçekçi sonuçlar elde etmek için bazı varsayımlara dikkate alınmalıdır. Bunlar numune şekli, boyutu, test numunelerin yağlanması ve nihai ölçüm olarak bilinmektedir. Basma testleri için silindirik veya prizmatik şekilli köpük numunelerin kullanılması önerilmektedir. Numune kenarı etkilerinden kaçınmak için numune boyutları, gözenek boyutunun yedi katından daha büyük olacak ve numune yüksekliğinin uzunluğuna oranı 1.5'ten fazla olması önerilmektedir. Köpük numune uzunluğunun etkisi olarak, kısa numunelerin uzun olanlardan daha yüksek bir ortalama basma mukavemetine sahip olduğu bildirilmektedir. Bunun nedeni uzun numunelerin yapısal kusurlar içermesi olasılığı daha yüksek olduğu için düşük mukavemet ve elastik modül ile ölçülmesi mümkün olmaktadır.

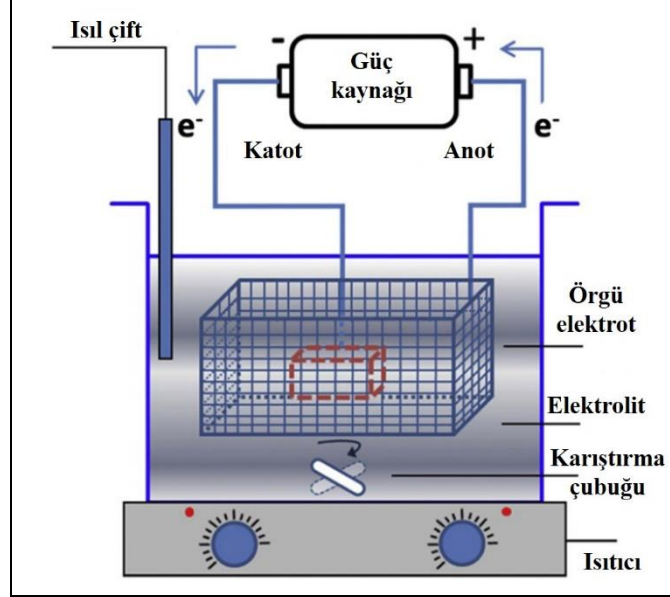
Metal köpük malzemelerin basma mukavemeti, genellikle yapay elastik bölgenin sonunda ulaşılan ilk tepe gerilimi okunarak gerilme-gerinme grafiklerinden

ölçülebilmektedir. Ancak, bazen bu tepe noktaları belirgin değildir ve bu durumda, yüklemenin ilk eğimi ile plato gerilmesinin eğimi kesişerek temsili bir değer belirlenebilmektedir. Güç yasası sertleşme davranışı sergileyen kütleli metal malzemelerde olduğu üzere metal köpük malzemelerin akma geriliminin, en iyi %0,2 plastik deformasyonuna karşılık gelen akma gerilim değerinin alınmasıyla ölçülmesi gerekmektedir. Gerilme-gerinme eğrisini, şekilde görüldüğü gibi, uygulanan yükün kaldırılması ile elde edilen eğriden belirlenen elastik modülü ile aynı eğime sahip %0,2 gerinmeden düz bir çizgi ile keserek yapılmaktadır.

### 3. METAL KÖPÜK MALZEMELERİ KAPLAMA YÖNTEMLERİ

#### 3.1. Elektrobiriktirme

Elektrobiriktirme metal bir altlık yüzeyine o metalin katyonlarının doğrudan bir elektrik akımıyla indirgenmesi şeklinde metal kaplama yapan yüzey kaplama yöntemi olarak bilinmektedir. Kaplanacak metal elektrolitik hücrenin katodu (negatif elektrot) görevi görür; elektrolit, kaplanacak metal tuzunun çözeltisidir ve anot (pozitif elektrot) genellikle ya o metalin külçesi veya bazı etkisiz iletken malzemelerdir. Akım harici bir güç kaynağı tarafından sağlanmaktadır. Anot yüzeyinde oksijen gazı çıkışı ve/veya metalin oksitlenmesi gerçekleşmektedir. Elektrolit ve metalin kimyasal aktivitesine bağlı olarak, oksidasyon işlemi ya yüzey çözünmesi ya da yüzeyde oksit film oluşumu yönünde ilerlemektedir. Aynı zamanda, katot yüzeyinde hidrojen gazı çıkışı ve/veya katyon indirgenmesi meydana gelebilmektedir. [Yerokhin et al., 1999]. Şekil 3.1’de bir elektrobiriktirme sistemi gösterilmektedir [Wang et al., 2013].



Şekil 3.1: Elektrobiriktirme sistemi.

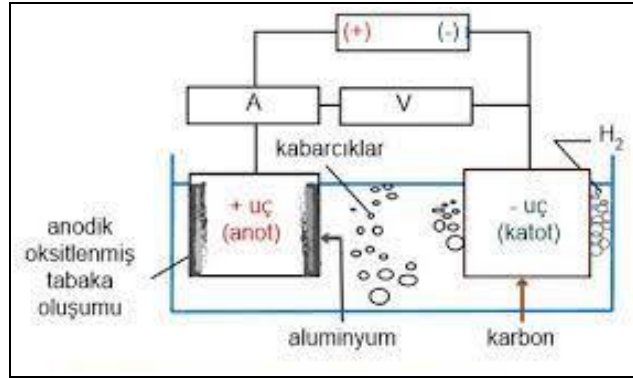
Literatürde, alüminyum köpük yüzeyinde nano kristal bakır (Cu), elektrobiriktirme işlemi ile heterojen olarak kalınlaştırılmış üç boyutlu Cu/Al kompozit köpük yapılı bir malzeme üretilmiştir. Çalışmada köpük gözenek boyutunun

ve Cu kaplama kalınlığının bir fonksiyonu olarak enerji sönümleme kapasitesi araştırılmıştır. Kompozit köpük yapının kaplamasız alüminyum köpüğe göre % 73 daha iyi bir enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir [Wang et al., 2013]. Başka bir çalışmada, gözenek yoğunluğu 10 ppi olan açık gözenekli alüminyum köpük yüzeyi sertlik değeri 4,5 GPa olarak verilen 150 µm kalınlığında nikel ile kaplanmıştır [Jung et al., 2014]. Bir diğer çalışmada, ağsı yapıdaki alüminyum köpüklerin kirişleri, elektrobiriktirme yöntemiyle nano kristal Ni-W ile kaplanmış ve 3 saat kaplama süresinde üretilen köpüğün basma gerilme-gerinme eğrisinden yaklaşık olarak en yüksek 7 MPa basma mukavemet değeri ölçülmüştür [Boonyongmaneerat et al., 2008]. Açık gözenekli alüminyum köpük malzemelerin ısı ve mekanik özelliklerini geliştirmek için yapılan bir çalışmada, alüminyum köpük yüzeyinde bakırın (Cu) elektrobirikimi geliştirilmiş ve en yüksek akma mukavemet değeri 1,236 MPa olarak 378,4 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğundaki köpükte tespit edilmiştir [Antenucci et al., 2014]. Elektrobiriktirme yöntemi ile açık gözenekli alüminyum köpük yüzeyinde grafen kaplanması sonrasında köpüğe uygulanan basma testinden akma mukavemeti değeri 3,106 MPa olarak açıklanmaktadır [Antenucci et al., 2015]. Açık gözenekli alüminyum köpük malzemenin elektrobiriktirme işlemi ile yüzeyinde nano bakır oluşturulan bir diğer çalışmada, yüksek gerinmeli basma testinden basma mukavemeti 12,68 MPa olarak belirlenmiştir [Sun et al., 2014]. Açık gözenekli alüminyum köpüklerin kiriş yüzeyi üzerine elektrobiriktirme işlemi ile amorf bir Ni-P kaplamanın üretildiği bir çalışmada, 65 µm kaplama kalınlığındaki kaplanan köpüğün basma mukavemeti 11.9 MPa olarak verilmektedir [Li et al., 2016].

### 3.2. Anotlama

Anotlama, metaller, alaşımlar ve yarı iletkenlerin elektrokimyasal yüzey oksidasyonu işlemi olarak uygulanmaktadır. Elektrotların bulunduğu ortama (oksijen-içeren) göre farklı anotlama işlemleri bulunmaktadır; sulu elektrolit çözeltilerde anotlama, ergimiş tuzlarda anotlama, plazma anotlama ve plazma elektrolitik oksidasyon. Sulu elektrolit çözeltilerde anotlama, elektronik endüstrisinde kapasitörlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Erimiş tuzlarda anotlama, özellikle bakır ve demir yüzeylerde, kalın ve sert (mikro sertlikte) oksit filmler hazırlamak için kullanılmaktadır. Anodik alüminyum oksit filmler yüksek termal,

mekanik ve kimyasal kararlılığa, eşsiz bir gözenekli yapıya (kontrollü çaplı düz gözenekler) sahiptir. Bu özellikleriyle; filtrasyon ve karışımların ayrılması, veri depolama, sensörler ve tek boyutlu nano yapıların sentezi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 3.2’de gösterilen sistemde elektrolitten geçen elektrik akımı ile, metal yüzeyi bir oksit fazına dönüştürülmektedir.



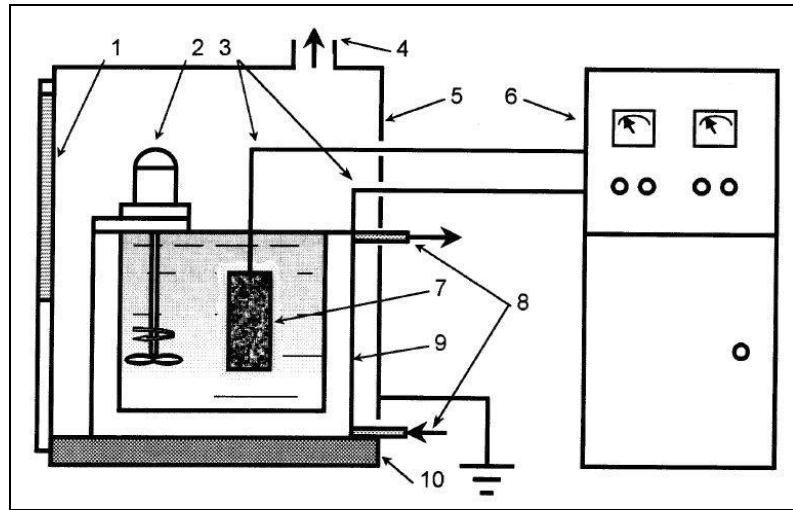
Şekil 3.2: Anotlama yöntemi hücresi.

Anotlama, bir metalin (genellikle alüminyum) yüzeyinin, elektrolizle yükseltgeme yoluyla bir kaplamaya dönüştürülmesi yöntemine denilmektedir. Anotlama sırasında, kaplama metalin yüzeyinden içeri doğru büyümektedir. Kaplama, alüminyumun yüzeyine seramik fazı oluşturulmaktadır. Anotlama sırasında alüminyum anot olarak, metal ya da karbon katot olarak işlev görmektedir. Alüminyumun kaplandığı elektrolit çözeltisi olarak sülfürik asit ya da kromik asit kullanılabilir. Alüminyum yüzeyini alüminyum oksit kaplamasına dönüştürmek için, elektrik akımı uygulanmaktadır. Anotlama işleminde ayrıca, alüminyum yüzeyinde renklendirme de yapılabilir. Anotlanan alüminyum, yapı sanayisinde, ulaşım araçlarında, ışıklendirma tesisatı ve elektrik uygulamalarında yaygın biçimde kullanılır.

Literatürde açık gözenekli alüminyum köpüklere korozyon direncini arttırmak için anotlama ve elektro biriktirme işlemlerinin birlikte uygulanarak yüzeyde alüminyum oksit ve karbon kaplama yapılmıştır [Stergioudi et al., 2015].

### 3.3. Plazma Elektrolitik Oksidasyon (PEO)

PEO, geleneksel anodik oksidasyon işleminin alkali çözeltilerde yüksek elektrik voltajlarında gerçekleştirilen bir yüzey işleme yöntemidir. PEO yöntemi ile Al, Mg, Ti ve Zr gibi hafif metallerin ve bunların alaşımlarının yüzeyi seramik oksitlere dönüştürülmektedir. Şekil 3.3'te gösterilen PEO yüzey kaplama yönteminde elektrik akımı uygulanması ile eşzamanlı olarak metal yüzeyinde metal oksit tabakası oluşmaya başlamaktadır. Yüzeyde oluşan oksit filmin kırılma voltajı üzerinde, yüzey tabakasında mikro ark olarak adlandırılan elektriksel deşarjlar gelişmektedir. Daha sonra, yüzeyde oluşan deşarj kanalları içerisinde plazma ile güçlendirilmiş kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Seramik oksit fazlarının kristalleşmesi, sinterlenmesi, oluşumu ve dönüşümü bu deşarj kanallarında meydana gelmektedir. Deşarj kanalları tamamen seramik oksitlerle dolduğunda, elektrolit/kaplama ara yüzeyi çevresinde seramik oksitler çözelti tarafından hızlı soğuma oranlarına maruz kalmaktadırlar. Bununla birlikte, altlık metal-kaplama ara yüzeyinin yakınında nispeten düşük soğuma hızları meydana gelmektedir. Bu işlemlerin bir sonucu olarak, gözenekli ve pürüzlü bir yüzey kaplama tabakası ile altlık metal malzemeye iyi yapışan, yüksek sertlikte bir iç kaplama tabakası içeren PEO kaplaması oluşmaktadır [Yerokhin et al., 1999].



Şekil 3.3: PEO kaplama sistemi: (1) pencere, (2) karıştırıcı, (3) bağlantı kabloları, (4) gaz çıkış vantilatörü, (5) topraklanmış kasa, (6) güç ünitesi, (7) iş parçası, (8) soğutma sistemi, (9) banyo, (10) izolasyon plakası.

PEO yöntemi metal yüzeyinde, geleneksel elektroliz ve atmosferik plazma işlemlerinin birlikte uygulandığı bir yüzey modifikasyon yöntemidir. Plazma destekli yüzey modifikasyon işlemlerinde amaç, metalin aşınma ve korozyon direnci ile yorulma ve oksidasyon dayanımını artırmaktır. Geleneksel yüzey işlemlerinden farklı olarak elektrolitik plazma tekniği iki olguyu kapsamaktadır. İlk önce, iş parçası ve karşı elektrot arasında farklı elektrik potansiyellerinin uygulanması ile sıvı ortamın elektrolizi gerçekleşmektedir. Sonra, iş parçası yüzeyinin çevresinde elektriksel deşarjlar oluşmaktadır. Elektriksel deşarjlar mikro ölçekte oluşmakta; metal yüzeyinde ısı, plazma-kimyasal ve hidrodinamik etkiler meydana getirmektedir [Yerokhin et al., 1999].

PEO, elektrokaplama ve anotlama yöntemlerinde olduğu gibi iletken çözelti ortamında gerçekleştirilmektedir. PEO, geleneksel anotlama yönteminden türetilen bir işlem olup, anotlamadan farklı olarak alkali çözelti içerisinde, yaklaşık olarak 1000 V gibi yüksek voltaj ve alternatif akım veya darbeli akım altında uygulanabilmektedir. Aşınma, korozyon ve ısı direnci yüksek, elektriksel olarak yalıtkan ve çok fonksiyonlu seramik benzeri kaplamaların PEO ile oluşturulması mümkün olmaktadır. Plazma elektrolitik oksidasyonu anotlamadan farklı kılan bir başka özelliği de elektrolit içerisinde işlem altında bulunan metal yüzeyinde düzensiz olarak hareket eden elektriksel mikro deşarjların oluşmasıdır. Ayrıca, PEO ile oluşan kaplamaların bileşim, yapı ve özelliklerinin geleneksel anotlama ile oluşturulan oksit tabakalarından çok daha iyi olduğu belirtilmektedir [Abdulla et al., 2011].

Literatürde PEO yöntemi ile açık gözenekli alüminyum köpük malzemeye oksit seramik kaplama uygulaması ve oluşan nihai kompozit yapıların mekanik özellikleri hakkında az sayıda çalışma yer almaktadır. PEO ile yapılan bir çalışmada, açık gözenekli alüminyum köpük malzemede, açık gözenekleri oluşturan alüminyum kırımların yüzeyinde seramik kaplama oluşturmuşlardır. Kullanılan alüminyum köpük malzemeler yaklaşık olarak ortalama  $0.25 \text{ Mg/m}^3$  yoğunluğa ve %90 gözeneklilikte oldukları bildirilmiştir. Alüminyum köpük malzemeler 1,5 g/L KOH (Potasyum Hidroksit), 10 g/L  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  (Tetra Sodyum Pirofosfat) ve 10 g/L  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (Sodyum Silikat) içeren alkali çözelti içerisinde,  $15 \text{ A/dm}^2$  akım yoğunluğunda ve 50 ile 180 dakika arasında değişen sürelerde kaplanmıştır. Basma testi sonucu kaplama yapılmayan alüminyum köpük yaklaşık olarak 3 MPa'da düz bir gerilme-gerinme eğrisi sergilerken, PEO uygulanan kompozit malzemelerin eğrileri yaklaşık aynı

gerilmede tepe yaparak daha düşük gerilmelerde düz bir eğri şeklini almaktadır [Dunleavy et al., 2011].

Başka bir çalışmada, plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi ile seramik kaplanan alüminyum köpüklerin özgül mukavemet değerleri hesaplanmaktadır. Çoğaltma yöntemi ile üretilen düşük gözenekli saf alüminyum köpük ve ERG Aerospace Corporation'dan tedarik edilen 6106-T6 alüminyum alaşımından oluşan yüksek gözenekli Duocel alüminyum köpük malzemeleri kullanılmaktadır. Plazma elektrolitik oksidasyon işlemi 10 g/L  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 2 g/L  $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$  ve 1 g/L KOH içeren sulu elektrolitik çözelti içinde, 250 Hz. frekansta voltaj uygulanarak 20, 40, 60 ve 80 dakika sürelerde gerçekleştirilmiştir. İşlem sonucu alüminyum köpük yüzeyinde oluşan fazlar ile kütsel olarak kaplanan alüminyum metali yüzeyinde oluşan fazlar aynı olmaktadır. Yüzeyde sert, aşınma ve korozyon direnci yüksek  $\alpha$ -alümina ve  $\gamma$ -alümina fazları ile mullit, silikat camsı veya yarı kristal fazlar oluşmaktadır. PEO süresine bağlı olarak kaplama kalınlığı, gözenekliliği ve oluşan fazlar da değişmektedir. PEO işlemi sonrasında uygulanan basma ve çekme testleri sonucunda çoğaltma tekniği ile üretilen yüksek yoğunluklu alüminyum köpüklerin mukavemetinin arttığı buna karşın düşük yoğunluklu Duocel marka köpüklerde kaplama kalınlığı az olanlarda başlangıçta düşük oranda arttıktan sonra azalmakta olduğu, kaplama kalınlığı yüksek olan köpüklerde ise azalmış olduğu tespit edilmektedir [Abdulla et al., 2011, Abdulla et al., 2014].

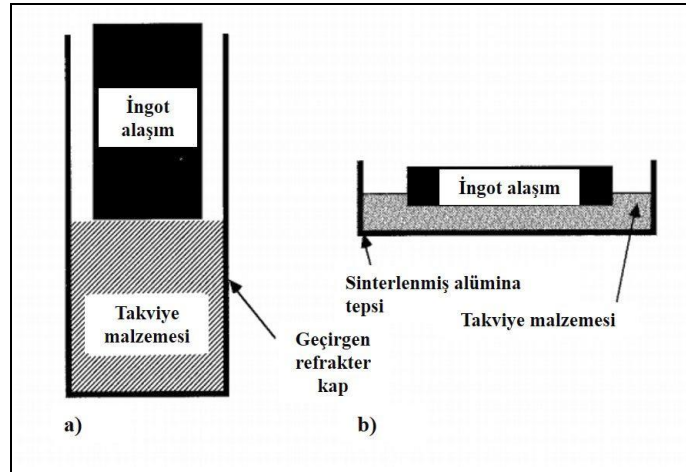
## 4. İNFİLTRASYON YÖNTEMİ İLE KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ

Metal ana fazlı kompozit malzemeler, özellikle üretim yöntemleri bakımından son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Takviyeli bir metalin özelliklerinin, monolitik bir metale göre performans olarak avantaj sağladığı gösterilmektedir. Ancak kompozit malzeme üretiminin yüksek maliyeti, yaygın ticari kullanımını sınırlamaktadır. Birçok potansiyel metal ana faz sisteminden, alüminyum alaşımı ana faz kompozit malzemeleri, öncelikle hafifliği, düşük maliyeti ve alüminyumun imalat kolaylığı nedeniyle birçok araştırmanın konusu olmaktadır. Alüminyum alaşımı ana fazlı kompozit malzemeler sınıfı içinde iki farklı malzeme sistemi vardır: (i) takviyenin parçacık, plaka, iğnecik veya lif şeklini aldığı süreksiz takviyeli kompozit malzemeler ve (ii) takviyenin tek yönlü veya çok yönlü bir sürekli lif dizisi şeklinde olduğu sürekli kompozit malzemeler. Süreksiz olarak güçlendirilmiş alüminyum alaşımları, toz metalürjisi yönteminde (metal ve seramik tozlarının karıştırılması ve ardından sıcak presleme) olduğu gibi katı hal işlemleri, sıvı hal işlemleri (seramik tozu ve erimiş alüminyum, çalkalama ve döküm) ve basınçlı sıvı metal infiltrasyonu işlemi ile üretilabilmektedir. Katı hal süreçleri bugüne kadarki en başarılı işlemler olmasına karşın maliyetli yöntemlerdir. Bu nedenle, sıvı metal işlemleri ekonomik olma potansiyeline sahip olmaktadır; ancak, pek çok seramiğin erimiş alüminyum tarafından ıslanmaması, zayıf seramik/metal ara yüzeyleri ve kusurlu infiltrasyon ile sonuçlanması engel oluşturmaktadır [Aghajanian et al., 1991].

### 4.1. Basıncsız İnfiltrasyon Yöntemi

Süreksiz veya sürekli takviye içeren alüminyum alaşımı ana fazlı kompozit malzemelerin üretimi için yeni bir sıvı metal infiltrasyon yöntemi olarak uygulanmaktadır. Uygun işlem koşullarının kullanılmasıyla, infiltrasyon kendiliğinden (kullanıldığı gibi, dışarıdan herhangi bir basınç veya vakum yardımı olmadan) gerçekleşmektedir. Şekil 4.1a ve Şekil 4.1b’de şematik olarak gösterilen iki deneysel düzenek kullanılabilmektedir. Her iki durumda da refrakter kap içinde bulunan gevşek bir takviye malzemesi yatağının üzerine bir alüminyum alaşımlı külçe yerleştirilmektedir. Alaşım/dolgu çiftleri daha sonra oda sıcaklığında  $1 \times 10^{-2}$  torr (1 torr = 133,322 Pa) basınçla boşaltılabilen ve nitrojen içeren ve nominal olarak oksijen

içermeyen bir atmosferle geri doldurulan kontrollü bir atmosfer fırınına yerleştirilmektedir. İstenmeyen gazların fırın içerisine girmesini önlemek için, çıkış gazının 25 mm'lik bir yağ kolonu içinden kabarcıklandırılmasıyla elde edilen hafif bir pozitif basınç altında gerçekleştirilmektedir. Fırın, belirli bir sürede ve hızda ergime sıcaklığına ayarlanmakta, belirtilen süre boyunca bu sıcaklıkta tutularak soğumaya bırakılmaktadır. Daha sonra numuneler fırından çıkarılarak oda sıcaklığına soğutulmaktadır [Aghajanian et al., 1991].

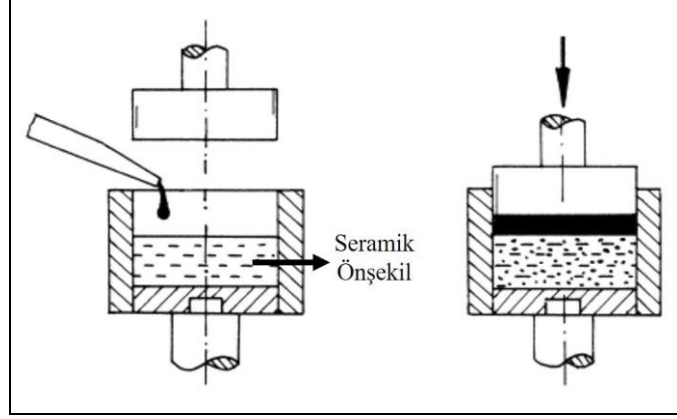


Şekil 4.1: Basıncsız İnfiltrasyon yönteminin şematik gösterimi.

## 4.2. Basıncılı İnfiltrasyon Yöntemi

Metal ana fazlı kompozit üretiminde kullanılan yöntemlerden biri olan sıkıştırılmalı döküm, diğer kompozit üretim yöntemlerinden uygulama bakımından basit ve ucuz olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Karmaşık şekilli parçaların kolaylıkla üretilebilmesi ve ergime sıcaklığı düşük metallerin (özellikle alüminyum) dökümü için elverişli bir yöntem olmaktadır. Sıkıştırılmalı döküm katılaşmanın yeniden kullanılabilir bir kalıp içinde yüksek basınç altında gerçekleştirildiği bir fabrikasyon tekniğini belirtmek için kullanılan genel bir terimdir. Bu yöntem, dövme ile sürekli kalıp dökümünü bir arada uygulayan ve tek bir işlem olarak erimiş metalin uygulanan hidrostatik basınç altında katılaşması esasına dayanan bir metal şekillendirme işlemidir. Şekil 4.2’de gösterilen yöntemde bir kalıp grubu veya seramik ön şekil önceden ısıtılmış bir hidrolik pres üzerine yerleştirilmekte ve ergimiş alaşım, açık kalıp setinin alt yarısına dökülmektedir. Piston basıncı tam

katılaşma oluşuncaya kadar (31-108 MPa) muhafaza edilmektedir [Ghomashchi and Vikhrov, 2000].



Şekil 4.2: Direkt sıkıştırırmalı döküm infiltrasyon yönteminin şematik gösterimi.

## 5. AĞIRLIK DÜŞÜRME DARBE TESTİ

Çeşitli mühendislik alanlarında, kompozit malzemeler, spesifik özellikleri ve tasarım esnekliği nedeniyle geleneksel malzemelerin yerini hızla almaktadır. Özellikle son birkaç on yılda, kompozit malzemelerin uçak ve uzay yapılarından otomotiv, savunma ve deniz uygulamalarına kadar değişen yapısal uygulamalarda kullanımına, darbe yükü altındaki davranışları nedeniyle artan bir ilgi olmaktadır.

Metallerde gerçekleşen darbe hasarı, darbeden etkilenen yüzeyde başladığı için kolayca tespit edilebilmektedir. Ancak, kompozit malzemelerdeki hasar genellikle darbeden etkilenmemiş yüzeyde veya bir iç katmanda ayrılma şeklinde başlamaktadır. Darbe hasarı genellikle metal yapılarda bir tehdit olarak kabul edilmemektedir, çünkü malzemenin sünek yapısı nedeniyle büyük miktarda enerji soğurulabilmektedir. Akma gerilmesinde malzeme, işleme sertleşmesinden önce sabit akmada çok büyük gerilmelerde (%20'ye kadar) biçim değiştirebilmektedir. Buna karşılık, kompozit malzemeler çok çeşitli biçimlerde hasara maruz kalabilmektedir ve gözle zor görülebilen ancak yine de kompozit malzemenin yapısal bütünlüğünü ciddi şekilde azaltan darbe hasarı içerebilmektedir. Çoğu kompozit malzeme kırılındır ve bu nedenle darbe enerjisini sadece esnek biçim değiştirme (kalıcı biçim değiştirme yoluyla değil) ve hasar mekanizmaları yoluyla soğurabilmektedir [Richardson and Wisheart, 1996].

Hasar direnci terimi, kompozit bir sistemde uyarılan darbe hasarının miktarını ifade etmektedir. Kompozit levha üzerindeki etkilerin büyük çoğunluğu enine yönde olmaktadır, ancak kalınlık boyunca takviye eksikliğinden dolayı, enine hasar direnci özellikle zayıf kalmaktadır. Katmanlar arası gerilmeler (kayma ve çekme) genellikle, tabakalar arası düşük mukavemet nedeniyle ilk kırılmaya neden olan gerilmelerdir. Sonuç olarak, darbe hasarına karşı koruma sağlamak için %0,5'lik tasarım hasar gerilmeleri kullanılmaktadır ve bu da kompozit malzemelerin hasarında mükemmel düzlem içi mukavemet ve sertlik özelliklerinden yararlanılmaktadır [Richardson and Wisheart, 1996].

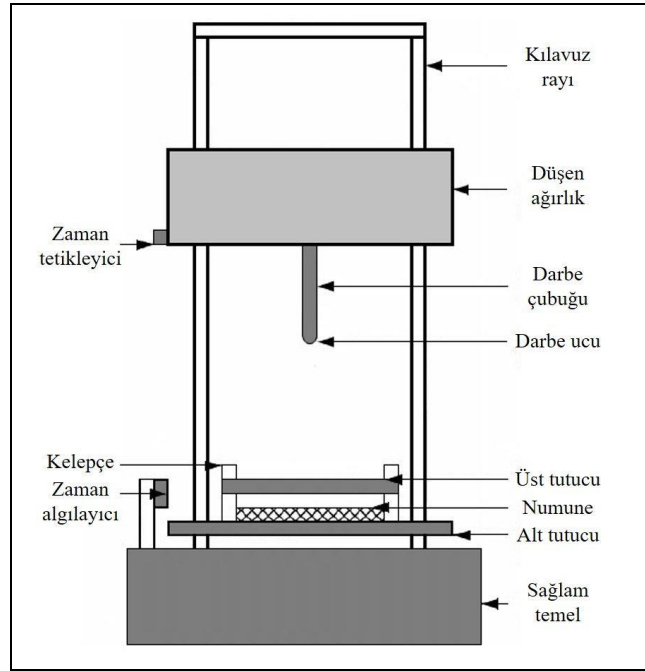
## 5.1. Düşük Hızlı Ağırlık Düşürme Darbe Testi

Genel olarak, darbeler düşük veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılmaktadır. Düşük hızlı darbe, hedef malzemenin sertliğine, malzeme özelliklerine ve çarpma tertibatının kütlesine ve sertliğine bağlı olarak üst limiti  $1-10 \text{ ms}^{-1}$  arasında değişebilmekte ve yarı statik olarak değerlendirilmektedir. Yüksek hızlı darbe testinde, yapının tepki vermek için zamanın olmadığı, bölgesel hasara yol açan, malzeme boyunca stres dalgası yayılımı baskın olmaktadır. Düşük hızlı darbede, temas süresi tüm yapının darbeye tepki vermesi için yeterince uzun olduğundan ve sonuç olarak daha fazla enerji esnek olarak soğurulduğundan, hedefin dinamik yapısal tepkisi son derece önemli olmaktadır [Richardson and Wisheart, 1996].

İki darbe türüne örnek olarak yabancı bir cismin bir yapıya çarpması veya bir uçak veya helikopterin bir çarpışma inişine maruz kalması verilebilmektedir. İkinci örnek genellikle “çarpışmaya elverişlilik” olarak değerlendirilmektedir ve sünek metallerin enerji soğurma özelliklerinden tamamen yararlanıldığı otomobil tasarımında rutin olarak kullanılmaktadır. Buradaki amaç, biçim değiştirebilen ve enerjiyi soğurabilen ancak yolcu bölmesini az çok sağlam bırakabilen bir yapı tasarlanmasıdır. İmalat veya hizmet sırasında düşen araç gereçler,  $50 \text{ J}$ 'e kadar olan enerji düzeylerinde  $4-8 \text{ ms}^{-1}$  aralığında nispeten düşük hız vakalarıdır.  $70 \text{ ms}^{-1}$ 'e kadar hızlarda kontrol dışı parçalardan kaynaklanan etki, yine yaklaşık  $50 \text{ J}$  enerjili orta hız olarak sınıflandırılabilir. Mühimmat veya füze parçalarından kaynaklanan balistik darbe,  $300$  ila  $2.500 \text{ ms}^{-1}$  aralığında “yüksek hız” olarak sınıflandırılmaktadır. Mermilerin kütlesi sadece birkaç gram olabilmekte, ancak kinetik enerjileri  $10-20 \text{ kJ}$  olabilmektedir. Bu hızlarda darbe olayı o kadar kısa olmaktadır ki yapının küresel eğilme veya kesme durumlarında tepki vermek için zamanı kalmayabilmektedir ve asıl mesele tam nüfuz etme durumunun gerçekleşip gerçekleşmeyeceği olmaktadır. Örneğin çeşitli kompozit malzemeler kullanan vücut zırhı, tam nüfuz etme durumuna direnecek şekilde tasarlanmaktadır [Davies and Olsson, 2004].

Şekil 5.1'de şematik olarak gösterilen ağırlık düşürme darbe testinde, yatay düzlemde desteklenen test numunesine veya plakaya çarpmak için bir ağırlığın önceden belirlenmiş bir yükseklikten düşmesine izin verilmektedir. Genel olarak, darbe olayında, çarpma geri tepmeleri test numunesinin tamamen tahrip olmasına neden olmaz ve gerekirse artan bir enerjinin belirlenmesini sağlamaktadır. Çarpma

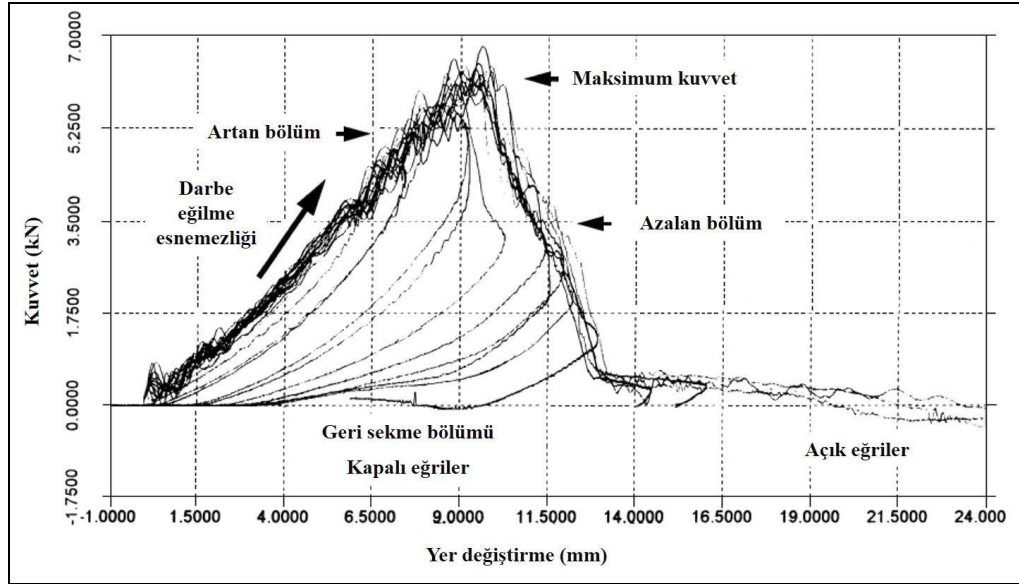
tertibatının çarpma hızı, hareket denklemlerinden veya hedefin hemen üzerinde bulunan optik algılayıcılar kullanılarak belirlenebilmektedir.



Şekil 5.1: Darbe test makinesinin şematik diyagramı.

Kompozit levhaların kuvvet-sapma eğrilerini gösteren bir grafik şekil 5.2’de verilmektedir. Her bir kuvvet-yer değiştirme eğrisinin yükselen bölümünün eğimi, çarpma başlangıcında darbe kaynaklı eğilme altında kompozit malzemelerin esnemezliğini temsil etmesinden dolayı darbe eğilme esnemezliği olarak adlandırılmaktadır. Tüm kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin eğimi benzer şekilde (benzer darbe eğilme esnemezliğini gösteren) artmaktadır. Daha sonra her bir eğri maksimum kuvvet düzeyine ulaşmaktadır. Şekil 5.2’ye göre, darbe enerjisi düzeyleri arttıkça maksimum kuvvetler artmaktadır. Darbe enerjisi yeterince yüksek olduğunda, maksimum kuvvetler benzer bir değere sahip olmaktadır. Bu değer, darbe testinde kompozit malzemelerin tepe kuvveti olarak adlandırılmaktadır. Tam nüfuz etme durumu veya delinme hasarı oluşmayan darbe testlerinde, kuvvet-yer değiştirme eğrisi yükselmekte, maksimum seviyeye ulaşmakta ve orijine geri dönmektedir. Çarpma tertibatının kompozit malzeme üzerine çarpmasını ve kompozit malzemeden geri tepmesini temsil eden kapalı bir eğri oluşturmaktadır. Kapalı eğrinin kapsadığı alan, darbe testinde kompozit malzeme tarafından soğurulan enerji miktarı olmaktadır. Çarpma enerjisi arttıkça, kapalı alanın ve dolayısıyla soğurulan enerji miktarının da

arttığı görülmektedir. Darbe enerjisi artırıldığı takdirde, delinme hasarı gerçekleşmektedir. Delinme meydana geldiğinde, kuvvet sapma eğrisi artık kapalı bir eğri olmamaktadır. Açık kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve yer değiştirme eksenini ile sınırlanan alan, delikli kompozit malzeme tarafından soğurulan enerji olmaktadır [Liu et al., 2000].



Şekil 5.2: Kompozit levhaların kuvvet-yer değiştirme eğrileri.

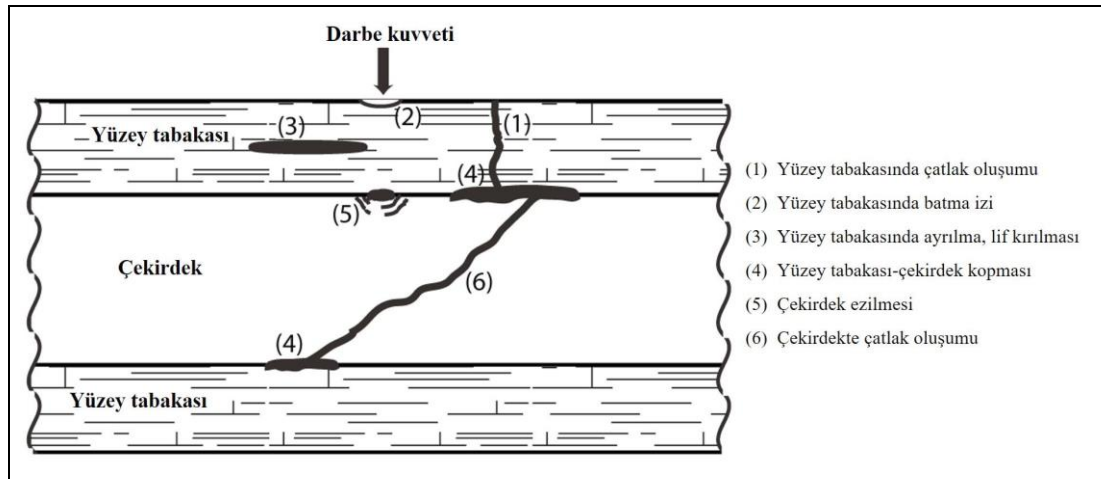
## 5.2. Düşük Hızlı Ağırlık Düşürme Darbe Testinde Hasar Analizi

Darbe hasarı, batma izi ve küresel yer değiştirmenin etkileşiminden kaynaklanırken, katmanlı levhalarda ve sandviç panellerde saf batma hasarı, panel arka yüzü desteklendiğinde veya küresel yer değiştirme etkisinin ihmal edilebilir olduğu durumlarda gözlenmektedir. Katmanlı levhalarda batma hasarı ve darbe hasarı, batma hasarının çok daha yerel olmasına rağmen, matris çatlakları, tabakaların ayrılması ve fiber kırılması gibi bir dizi yaygın hasar özelliğini içermektedir. Çekme, basma ve kesme gerilmelerinin neden olduğu matris çatlakları normal olarak, darbe merkezine yakın bir alanda tüm hasar bölgesi içinde dağılmaktadır. Tabakaların ayrılması, esas olarak matris çatlakları ve katmerlerin esnemezlilik uyumsuzluğu ile artan tabakalar arası kayma gerilmeleri tarafından uyarılmaktadır [Davies and Olsson, 2004].

Lif takviyeli katmanlı plastik kompozit malzemelerin heterojen ve yönlü doğası dört ana hasar durumu sunmaktadır: (1) ana faz hasarı, çatlak oluşumu çekme, basma

veya kayma nedeniyle liflere paralel olarak gerçekleşmektedir; (2) ayrılma hasarı, katmanlar arası gerilmeler tarafından üretilmektedir; (3) lif hasarı, çekme gerilmesi altında lif kırılması ve basma gerilmesi altında lif eğilmesi; (4) nüfuz etme hasarı, darbeye maruz kalan yüzey darbe ucu tarafından tamamen delinmektedir.

Düşük hızlı darbelere maruz kalan sandviç kompozitlerdeki hasar, üç farklı sınıflandırmaya ayrılabilir: Şekil 5.3'te gösterildiği gibi yüzey tabakası hasarı, yüzey tabakası-çekirdek arayüz hasarı ve çekirdek hasarı. Yüksek darbe enerjilerinde yüzey tabakalarına verilen hasar, fiber kırılması ile ana faz çatlaması ve ayrılma yoluyla olmaktadır. Lif kırılmasının bir sonucu olarak darbe yerinde genellikle yüzey tabakalarında önemli girintiler meydana gelebilmektedir. Köpük çekirdekli sandviç kompozit yapıların çekirdeğindeki hasar, çekirdek çatlaması veya çekirdek ezilmesi olarak sınıflandırılabilir. Darbe yüklemesinin bir sonucu olarak, üst yüzey tabakasındaki darbe bölgesinden kaynaklanan çekirdekte bir kayma gerilmesi çatlağı belirlemek ve çekirdekten alt yüzey tabakasına doğru yayılmaktadır. Bu çatlak, köpüğün kayma gerilmesi hasarından kaynaklanmaktadır. Çatlak, köpük çekirdek boyunca yayılmakta ve daha sonra yüzey tabakası-çekirdek ayrılmaları şeklinde dallanmaktadır. Çekirdek ezilmesi, gözenek duvarının eğilmesi veya kırılması nedeniyle köpük gözeneklerinin çökerek çekirdek içinde bir boşluk/çukur oluşturmaktan kaynaklanmaktadır [Mohammed et al., 2014].



Şekil 5.3: Düşük hızlı darbe altında bir sandviç kompozit malzemede deneysel olarak gözlemlenen hasar mekanizmaları.

Literatürde, alüminyum köpük çekirdekli ve kompozit yüzey levhalı sandviç panellerin mekanik tepkisini ve enerji soğurmasını incelemek için yarı statik delinme ve düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmada, sandviç paneller üç farklı darbe ucu ile delinmiş ve sandviç panellerin biçim değiştirme ve hasar davranışları araştırılmıştır. Yük-yer değiştirme tepkileri ve enerji soğurma değerleri, yarı statik ve düşük hızlı ağılık düşürme darbe testleri için kaydedilmiştir. Tüm yarı statik ve düşük hızlı darbe testleri için, kuvvet, üst yüzey tabakasının hasarıyla bağlantılı bir birinci maksimum kuvvet noktasına kadar darbe ucunun yer değiştirmesi ile artmıştır. Daha sonra, kuvvet azalarak yatay bir seviyede kalmakta ve daha sonra alt yüzey tabakası kırılana ve numune yük taşıma kapasitesini kaybedene kadar köpük çekirdeğin ezilmesiyle artmakta olduğu bildirilmektedir [Li et al., 2012].

Başka bir çalışmada, alüminyum köpük çekirdekli ve 1100 alüminyum alaşımı, 314 alaşımlı paslanmaz çelik ve karbon lif takviyeli polimer kompozit olmak üzere çeşitli yüzey tabakalarına sahip bloklar 6,7 m/s darbe hızında incelenmiştir. Paslanmaz çelik yüzey levhalı blokların, neredeyse tüm darbe enerjisini soğurduğu ve diğer yüzey levha malzemelerine sahip bloklara kıyasla enerji soğurma kapasitesi olarak en iyi seçim olduğu tespit edilmiştir. Darbe ucunun çevresinde köpük çekirdek çökmesi ve yırtılması, herhangi bir yüzey tabakası olmayan numuneler için hasar mekanizmaları olarak belirlenmiştir. 1100 alüminyum alaşımı yüzey levhalı bloklar için yüzey levhasında akma, hasar başlatma mekanizması olarak bulunurken, paslanmaz çelik ve karbon lif takviyeli polimer kompozit yüzey levhalı bloklar için yüzey levhasında eğilme ve gerilme hasar mekanizmaları olarak bulunmuştur. Çekirdek yüzey levhasın arasında ayrılmanın, darbe sırasında paslanmaz çelik levhalarda daha sonra ortaya çıktığı tespit edilmiştir [Mohan et al., 2011].

İçi boş çelik küreler ve A356 alüminyum alaşımı ana fazdan oluşan kompozit metal köpük malzemenin statik basma altındaki enerji soğurma davranışının incelendiği bir çalışmada, kompozit metal köpüğün benzer malzemelerden üretilen diğer ticari olarak temin edilebilen metal köpüklerden daha yüksek bir enerji soğurma kabiliyetine sahip olmakla birlikte, aynı zamanda daha yüksek bir mukavemet/yoğunluk oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Kompozit metal köpük numunelerin enerji soğurmasındaki artış, katkısız alüminyum köpükler ile karşılaştırıldığında 30 katın üzerinde, çelik köpükler ile karşılaştırıldığında ise iki kattan fazla olduğu bildirilmektedir. Kompozit metal köpük malzemenin yükleme altında kırılması, alüminyum-çelik ara yüzeyinde oluşan çeşitli ara fazların kırılması

ve ayrılmasından kaynaklanmaktadır. Mikrosertlik test sonuçları, mikroyapıdaki  $\text{Fe}_2\text{Al}_7\text{Si}$  ara fazların sert ve kırılğan olduğunu ve malzemenin sünekliğini düşürme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu ara fazların derişimi ve boyutu, artan işlem sıcaklığı ile artmaktadır. Bununla birlikte, içi boş çelik küreler arasında sünek bir ana fazın varlığı, başlatılan çatlak ucunun körelmesine yardımcı olmakta ve malzemenin ek olarak süneklik ve enerji soğurma kazanmasını sağlamaktadır [Vendra and Rabiei, 2007].

Başka bir çalışmada, basınçlı infiltrasyon döküm yöntemiyle üretilen farklı türdeki seramik gözenekli küreler ile takviye edilen alüminyum ana fazlı sentaktik köpüklerin statik ve dinamik koşullar altında mekanik davranışı ve enerji soğurması araştırılarak ve basınçlı infiltrasyon döküm yöntemiyle üretilen açık gözenekli alüminyum köpükler ile karşılaştırılmaktadır. Basma testlerinde, sentaktik köpüklerin çoğu, kalıcı biçim değıştirmenin geç aşamasında çatlamaktadır. Alüminyum ana fazlı sentaktik köpüğün kayma kırılması ile hasara maruz kaldığı tespit edilmiştir. Alüminyum ana faz içindeki seramik kürelerden oluşan ağ tek başına herhangi bir kayma veya çekme yüklemesine dayanamaz; sentaktik köpük içindeki kayma gerilmeleri tamamen alüminyum kiriş ağı tarafından karşılanmaktadır. Basma gerilmelerinin ise alüminyum ve seramik ağlar arasında paylaşıldığı bildirilmiştir. Sentaktik köpüğün hasar durumu, basma ve kayma sınırlarından hangisine önce ulaşıldığına bağlı olmaktadır [Zhang and Zhao, 2007].

## 6. ÇALIŞMANIN AMACI

Literatürde PEO yöntemi ile açık gözenekli alüminyum alaşımı köpük yüzeyinin seramik kaplanarak kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerine sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Ancak, PEO yöntemi ile alüminyum alaşımı köpük yüzeyini kaplama işlemi sonrası elde edilen kompozit köpük malzemenin açık gözeneklerine alüminyum alaşımının infiltrasyonu ile metal ana fazlı kompozit malzeme üretimi henüz yapılmamıştır.

Bu tez çalışmasının amacı, PEO yöntemi ile 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki açık gözenekli 6101 ve 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde seramik kaplama oluşturmak ve elde edilen kompozit yapının açık gözeneklerine vakum destekli basınçlı döküm işlemi uygulayarak A383 alüminyum alaşımının infiltre edilmesi ile nihai olarak içinde seramik-metal-seramik sandviç benzeri ağsı yapı içeren metal ana fazlı kompozit levha üretmek ve mekanik özelliklerini incelemektir. Bu kapsamda;

- Alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde PEO yöntemi ile alfa ve gama alümina fazlarını içeren seramik kaplama oluşturmak,
- Oluşturulan seramik kaplamaların yüzey ve ara kesitlerini mikroyapı ve kimyasal olarak karakterize etmek,
- Elde edilen kompozit köpük yapıların basma testi ile akma, basma, elastik modülü ve enerji soğurma kapasitelerini içeren mekanik özelliklerini belirlemek,
- Nihai olarak üretilen kompozit levhaların ara kesit mikroyapısını incelemek ve mikro-CT ile döküm yapısını tahribatsız yöntem ile görüntülemek,
- Kompozit levhalara eğme, ağırlık düşürme yöntemi ile darbe ve aşınma testlerini içeren mekanik testler uygulamak,
- Kompozit levhaların eğme ve darbe testlerinden sonra kırık yüzeylerini incelemek ve hasar analizi yapılması planlanmıştır.

Sonuç olarak, üretilen kompozit levhaların, zırh/yapısal malzeme teknolojileri konusunda, ülkemiz savunma sanayinde uygulama alanı bulması amaçlanmaktadır.

## 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, açık gözenekli alüminyum köpük malzemeler yüksek özgül dayanım gibi özellikleri nedeniyle yapısal ve işlevsel uygulamalarda tercih edildiğinden dolayı yüksek mukavemet ve rijitliği artırmak için bu malzemelerin plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi (PEO) ile yüzeyi seramik kaplanmıştır. Yüzeyi seramik ile kaplanan gözenekli alüminyum köpük malzemelere mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için vakum destekli basınçlı döküm yöntemi ile A383 alüminyum alaşımının infiltrasyon işlemi uygulanmıştır. PEO işleminden sonra yüzeyleri seramik kaplanan alüminyum köpük malzemelere mikroyapı karakterizasyonu; taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile kaplamanın ara kesit ve yüzey yapıları incelenmiş, farklı kaplama değişkenlerinde yüzeyde oluşan fazları belirlemek için SEM-EDX ve X-ışınları kırınımı (XRD) analizi yapılmış ve mekanik dayanımına etkisini belirlemek için basma testi uygulanmıştır. Metal/Seramik dönüşüm oranı PEO yönteminden sonra hesaplanmıştır. İnfiltrasyon işlemi uygulandıktan sonra üretilen nihai kompozit levhaların ara kesit mikroyapısını elde etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve iç yapısının üç boyutlu görüntüsünü elde etmek için x-ışını mikro bilgisayarlı tomografi (mikro-CT) tekniği kullanılmıştır. Ayrıca nihai kompozit levhaların mekanik özelliklerini incelemek için üç nokta eğme, darbe ve aşınma testleri uygulanmıştır. Yoğunluk ölçümleri tüm işlemlerin sonunda yapılmıştır.

### 7.1. Malzeme

Bu çalışmada gözenek yoğunlukları 20 ppi ve 40 ppi olan açık gözenekli 6101-T6 ve 6061-T6 alaşımı alüminyum köpük malzemeler kullanılmıştır. Açık gözenekli alüminyum köpük malzemeler Amerika Birleşik Devletleri menşeli ERG Materials and Aerospace Corporation firmasından, bağıl yoğunlukları %10-12 arasında değişen, 6101-T6 alaşımından 60 mm x 60 mm x10 mm boyutlarında ve 6061-T6 alaşımından 60 mm x 60 mm x 6 mm boyutlarında tedarik edilmiştir. 6101-T6 ve 6061-T6 alaşımlarının kimyasal bileşimleri Tablo 7.1 ve Tablo 7.2’de verilmektedir. T6 alaşımının mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla çözündürme ve takiben yapay yaşlandırma ısı işlemlerinin uygulandığını belirten bir numaralandırmadır. “ppi”

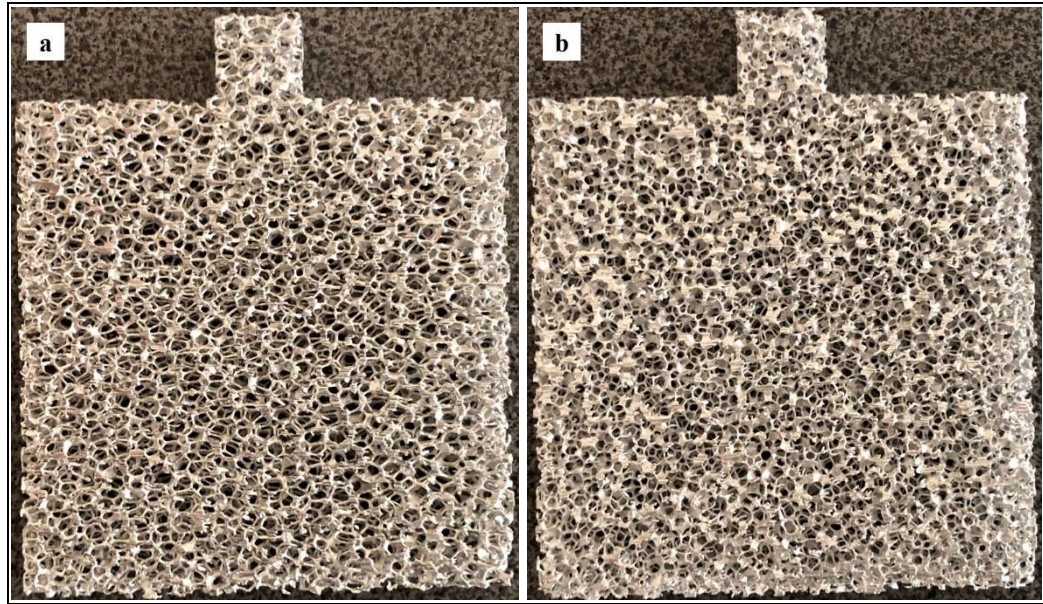
kısaltması bir inç doğru üzerindeki gözenek sayısını ifade etmektedir. “ppi” değerinin yüksek olması alüminyum köpük malzemede bulunan gözeneklerin birbirine yakın ve gözenek sayısının fazla olması anlamına gelmektedir. Şekil 7.1’de 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki alüminyum köpük malzemelerin makro görüntüleri gösterilmektedir.

Tablo 7.1: 6101-T6 alaşımına ait kimyasal bileşim (%ağırlıkça).

| Mg       | Si      | Fe  | Cu  | Mn   | Zn  | Cr   | B    | Diğer Toplam | Al   |
|----------|---------|-----|-----|------|-----|------|------|--------------|------|
| 0,35-0,8 | 0,3-0,7 | 0,5 | 0,1 | 0,03 | 0,1 | 0,03 | 0,06 | 0,1          | 97,6 |

Tablo 7.2: 6061-T6 alaşımına ait kimyasal bileşim (%ağırlıkça).

| Mg      | Si      | Fe  | Cu       | Mn   | Zn   | Cr        | Ti   | Diğer Toplam | Al        |
|---------|---------|-----|----------|------|------|-----------|------|--------------|-----------|
| 0,8-1,2 | 0,4-0,8 | 0,7 | 0,15-0,4 | 0,15 | 0,25 | 0,04-0,35 | 0,15 | 0,15         | 95,8-98,6 |



Şekil 7.1: a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki alüminyum köpük malzemelerin makro görüntüleri.

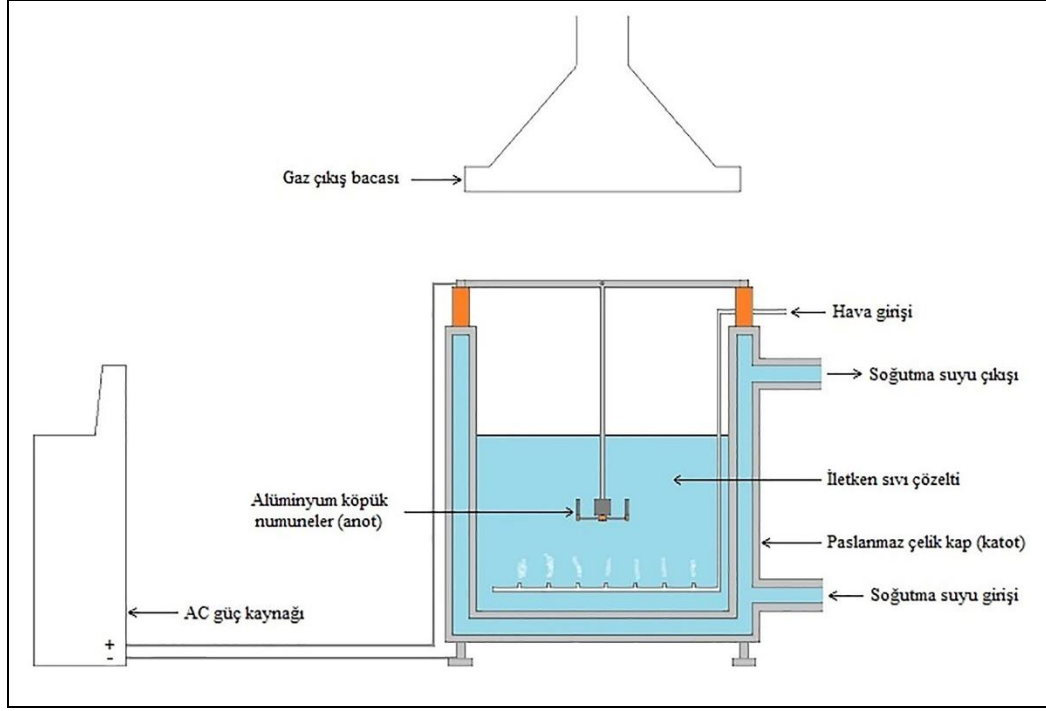
Kompozit levha üretimi için infiltrasyon işleminde A383 alüminyum alaşımı Süleyman Demirel Üniversitesinden temin edilerek kullanılmıştır. Tablo 7.3’te A383 alüminyum alaşımının % ağırlıkça kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 7.3: A383 alüminyum alaşımına ait kimyasal bileşim (%ağırlıkça).

| Si    | Cu   | Fe   | Mn    | Zn    | Ni    | Cr    | Mg     | Diğer<br>Toplam | Al   |
|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|-----------------|------|
| 11.23 | 2.19 | 0.67 | 0.267 | 0.232 | 0.046 | 0.032 | 0.0098 | 0.1232          | 85.2 |

## 7.2. Açık Gözenekli Alüminyum Köpük Malzemelerin PEO Yöntemi ile Seramik Kaplanması

Bu çalışmada açık gözenekli alüminyum köpük malzemelerin yüzeyinde seramik esaslı kaplama oluşturma işlemi Şekil 7.2’de gösterilen PEO sisteminde yapılmıştır. PEO sistemi başlıca paslanmaz çelikten imal edilen çözelti kabı, alüminyumdan imal edilen numune tutucu ve güç kaynağını içeren öğelerden oluşmaktadır. Güç kaynağı alternatif akım (AC) ile çalışmakta, 100 KW güç ve 300 A akım ile 0-1000 V potansiyel uygulayabilme kapasitesindedir. Çözeltinin yer aldığı paslanmaz çelik kap güç kaynağına katot; açık gözenekli alüminyum köpük numuneler ise anot olarak bağlanmıştır. Bu numuneler Şekil 7.1’de gösterilen çıkıntı bölgesinden alüminyum kablo ile tutturularak; işlem esnasında çözelti ile güç kaynağı arasındaki iletkenliğin kesilmemesi için, bu bölgeye epoksi reçine emdirilmiştir. Epoksi reçine emdirilen numuneler en fazla dört sayıda olacak şekilde yalıtkan bir kılavuza yerleştirildikten sonra dışı plastik ile kaplanmış numune tutucu çubuğa bir vida aracılığıyla bağlanarak çözelti ile dolu kap içerisine Şekil 7.2’de gösterildiği gibi sabitlenmiştir. PEO işlemi süresince paslanmaz çelik kap çeperlerinden oda sıcaklığındaki çeşme suyu dolaştırılarak çözeltinin ısınması önlenmiş ve sıcaklığı sabit tutulmuştur. İşlem esnasında çözeltinin homojen olarak kalmasını sağlamak amacıyla, çözelti içine daldırılan bölgesinden belirli aralıklarla delikler bulunan boru ile çözeltiye hava verilmiştir.



Şekil 7.2: PEO kaplama sistemi.

6101-T6 alaşımı açık gözenekli alüminyum köpük malzemelerden su jeti ile 20 mm x 20 mm x 10 mm boyutlarında kesilerek PEO işlemi ile seramik kaplanmıştır. 6061-T6 alaşımı açık gözenekli alüminyum köpük malzemeler 60 mm x 60 mm x 6 mm boyutlarında alınarak PEO işlemi uygulanmıştır. PEO işlemi bu çalışmada kullanılan tüm açık gözenekli alüminyum köpük malzemeler 4 g/L  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 2 g/L  $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$ , 2 g/L KOH ve saf su içeren iletken çözelti içinde gerçekleştirildi. İşlem süresince çözelti sıcaklığının 40 °C'yi geçmeyecek şekilde soğutma yapılmıştır. PEO işlemi öncesi ve sonrasında çözelti pH değeri 11-12 ve iletkenlik değeri 14-15 arasında ölçülmüştür. Açık gözenekli alüminyum köpük numuneler sabit çözelti derişiminde, 0,6-0,1 A/cm<sup>2</sup> arasındaki akım yoğunluklarında ve 30, 60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde PEO işlemi uygulanmıştır. Her bir kaplama değişkeni için, 6101-T6 alaşımından üç adet numune (iki adedi basma testi ve bir adedi mikro yapı incelemesi için) ve 6061-T6 alaşımından ise sekiz adet numune (altı adedi darbe testi, bir adedi basma testi ve bir adedi mikro yapı incelemesi için) hazırlanmıştır. Tablo 7.4'te 6101-T6 alaşımı için ve Tablo 7.5'te 6061-T6 alaşımı için kaplama değişkenleri verilmiştir.

Tablo 7.4: 6101-T6 alaşımında kullanılan kaplama değişkenleri.

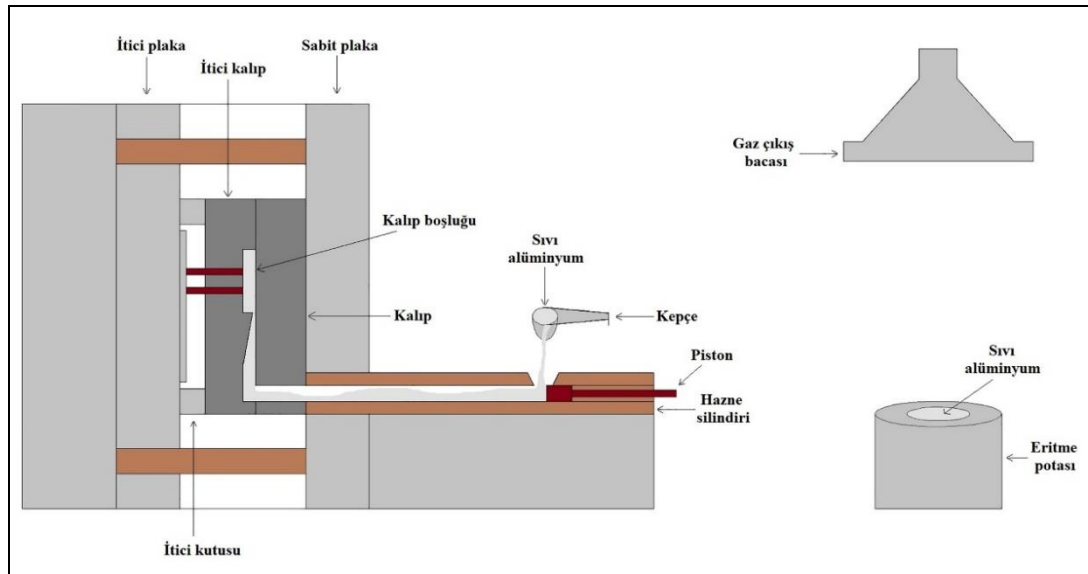
| Süre (dakika) | Akım yoğunluğu (A/cm <sup>2</sup> ) |        |
|---------------|-------------------------------------|--------|
|               | 20 ppi                              | 40 ppi |
| 30            | 0,1                                 | 0,08   |
| 60            | 0,1                                 | 0,08   |
| 90            | 0,09                                | 0,06   |

Tablo 7.5: 6061-T6 alaşımında kullanılan kaplama değişkenleri.

| Süre (dakika) | Akım yoğunluğu (A/cm <sup>2</sup> ) |        |
|---------------|-------------------------------------|--------|
|               | 20 ppi                              | 40 ppi |
| 30            | 0,08                                | 0,08   |
| 60            | 0,08                                | 0,07   |
| 90            | 0,08                                | 0,07   |

### 7.3. Vakum Destekli Basıncılı Döküm Yöntemi ile Kompozit Levha Üretimi

şekil 7.3'te gösterilen A383 alüminyum alaşımının vakum destekli basınçlı döküm yöntemi ile infiltrasyon işlemleri Süleyman Demirel Üniversitesi döküm laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde A383 alüminyum külçeler döküm makinesi yakınında bulunan eritme potasında eritilmiş ve bir kepçe yardımıyla sıvı metal haznesine dökülerek piston yardımıyla kalıp boşluğına doğru itilmiştir.



şekil 7.3: Vakum destekli Basıncılı döküm yöntemiyle infiltrasyon işlemleri.

H13 takım çeliğinden imal edilen, ısıtma işlemi uygulanmış 62 mm x 62 mm x 8 mm boyutlarında kalıp boşluğuna sahip bir kalıp yaptırılmış ve döküm makinesine bağlanmıştır. Kalıp sıcaklığı ısıtma ve soğutma regülatörleri ile kalıp içinden yağ dolaşımı sağlanarak 230°C’de sabit tutulmuştur. Basınçlı döküm makinesine vakum cihazı bağlanarak kalıp boşluğundaki hava ve istenmeyen gazların tahliyesi sağlanmıştır. Kaplanan numuneler 200°C’ye kadar etüv fırını içinde ısıtıldıktan sonra kalıp boşluğuna yerleştirilmiştir. Potaya gaz alma tableti ve argon gazı verilerek 770°C’de pota içerisinde A383 alüminyum külçeleri ergitilmiştir. Ergime işlemi tamamlandıktan sonra sıvı alüminyum bir kepçe yardımıyla eritme potasından alınarak basınçlı döküm makinesinin hazne silindiri içerisine dökülmüştür. Sıvı alüminyumun 80-90 bar gibi yüksek bir piston basıncı ile kalıp boşluğuna yerleştirilen malzemelere infiltre edilmesi sağlanmıştır. İnfiltrasyon işlemi uygulandıktan 15 saniye sonra katılaştıran nihai kompozit levha kalıptan çıkartılmıştır.

## **7.4. Mikroyapı İncelemesi**

### **7.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemesi**

Tüm numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri Philips XL30 SFEG marka cihazı kullanılarak yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesinden önce numuneler kesit alanlarından görüntü almak amacıyla kaplama yönüne dik olacak şekilde Struers Minitom marka hassas kesici cihaz vasıtasıyla elmas kesme diski ile kesildikten sonra epoksi reçine ile kalıba alınmıştır. Kalıplanan numuneler “Struers LaboPol 5” marka cihaz kullanılarak 180, 400, 800, 1200, 2000 ve 4000 no’lu SiC zımpara kâğıtları ile zımparalandıktan sonra 3 µm elmas ve 1 µm asıltılı silika ile parlatılmıştır.

Her numune incelenmeden önce yüzeyin elektriksel yüklenmesinden sakınmak ve seramik kaplanan yüzeylerin iletkenliğini sağlamak için altın ile kaplanmıştır. Numuneyi oluşturan atomlarla yüksek enerjili elektronların (gelen ışın) arasındaki etkileşimin türüne bağlı olarak, taramalı elektron mikroskobu tarafından farklı tepkiler üretilebilir. İkincil elektronlar ve geri saçılan elektronlar bu tepkiler arasında bulunur. Bu çalışmada, seramik kaplamaların yüzey ve ara yüzey mikro yapılarının üç boyutlu özelliklerinin incelenmesi için ikincil elektron görüntüleme (SEI) kullanılmıştır. Geri

saçılan elektron görüntüleme (BEI), özellikle kaplama gözenekliliğini incelemek amacıyla, gerektiğinde kullanılmıştır.

Açık gözenekli alüminyum köpük malzemelerin gözenek boyutu ve giriş kalınlığı ile, deneysel çalışmalarda üretilen seramik kaplamalar ve kompozit levhaların yüzey ve kesit alan mikro yapıları, kaplama kalınlıkları, ara yüzey ve kırık yüzey incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için kaplama kalınlık değeri numune yüzeyinden en az 10 farklı noktadan alındıktan sonra ortalama kalınlık değerleri ve standart sapma değerleri elde edilmiştir.

#### **7.4.2. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometre (EDS) İncelemesi**

Enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi, yüksek enerjili bir elektron kaynağı ve belirli bir numunenin atomik yapısı arasındaki etkileşimleri yorumlayan bir tekniktir. Gelen elektronlar, bir atomun iç kabuklarından bir elektronu kopardığında, dış kabuklardan gelen bir yüksek enerji elektronu, koparılan elektronun bıraktığı boşluğu doldurur. Yüksek ve düşük enerji kabukları arasında oluşan enerji farkı, bu malzemenin belirli özelliklerini belirten x-ışınları olarak saçılır. Saçılan x-ışınları, numunenin elementel veya kimyasal incelemesi ve çözümlemesi için toplanabilmekte ve kullanılabilmektedir. Her bir elementin kendine özgü bir atomik yapıya sahip olması gerçeğine dayanmaktadır ve dolayısıyla x-ışınları özgül enerjiye sahiptir.

PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların elementel çözümlemesi ve kimyasal bileşimi Philips XL30 SFEG marka taramalı elektron mikroskobu ile bütünleşik enerji EDAX marka enerji dağılımlı spektrometre (EDS) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların ve kompozit levhaların yüzey ve ara yüzeylerinde bulunan elementler atomik yüzde olarak belirlenmiştir.

#### **7.4.3. X-ışınları Kırınımı (XRD) İncelemesi**

PEO ile seramik kaplanan açık gözenekli alüminyum köpük numunelerin yüzeylerinde oluşan fazlar X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile belirlenmiştir. X-ışını kırınımı Cu-K $\alpha$  ışıının kaynağı ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) kullanılarak Rigaku MiniFlex600 ve Bruker D8 Advance marka cihazlar ile 2 $\theta$  üzerinde 20°-90° arasında ve 2°/dakika tarama hızında yapılmıştır.

Köpük numunelerin gözenekli yapısı XRD ölçümüne uygun olmaması sebebiyle kaplamaların faz çözümlemesi numune yüzeyinin havanda öğütülmesiyle elde edilen tozun kullanılmasıyla yapılmıştır. Öğütülen toz numuneler çözümleme yapılmadan önce 200 numaralı elek ile tane boyutu 75 µm altında olması için elekten geçirilmiştir.

#### 7.4.4. X-ışını Mikro Bilgisayarlı Tomografi (mikro-CT) İncelemesi

X-ışını mikro bilgisayarlı tomografi (mikro-CT), bilimsel araştırma uygulamalarında morfolojik yapıların tahribatsız görüntülenmesine izin veren hızla büyüyen bir tekniktir. X-ışını mikro-CT tekniği, 2 boyutlu kesit görüntüleme veya 3 boyutlu görüntü görselleştirme özelliği kullanılarak malzemelerin derinlemesine karakterize ve analiz edilmelerini sağlar. X-ışını mikro-CT test cihazı, x-ışını kaynağı, numunenin yerleştirildiği dönen bir tabla ve bir x-ışını detektöründen oluşmaktadır. Test sırasında numune, sabit x-ışını kaynağı ve detektör arasında döndürülerek x-ışını demetine maruz bırakılmıştır. Üretilen kompozit levhaların morfolojik yapısının X-ışını mikro-CT tekniği ile tahribatsız görüntüleme işlemleri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiştir. X-ışını mikro-CT cihazı olarak YXLON marka Y.MU2000 DCT modeli kullanılmıştır. Tarama işlemi 200 kV voltaj 2,65 mA akım ve 0,4 mm odak noktası boyutu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### 7.5. Metal/Seramik Dönüşüm Oranı Hesaplaması

Metal/Seramik dönüşüm oranı, altlık malzeme alüminyumun PEO işlemi süresince seramik oksitlere dönüştürülen kütle oranı olarak tanımlanmaktadır ve aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmıştır [Dunleavy et al., 2011].

$$DO = \left( \frac{m_{PEO} - m_0}{m_0} \right) \left( \frac{2M[Al]}{3M[O]} \right) \quad (7.1)$$

Eşitlik 7.1'de  $m_0$  ve  $m_{peo}$ , PEO işleminden önceki ve sonraki numunenin kütlelerini,  $M[Al]$  ve  $M[O]$  ise alüminyum ve oksijenin molar kütlelerini ifade etmektedir. Yukarıdaki eşitlik numunenin kütlesindeki artışın yalnızca oksijenin

seramik tabakaya dahil edilmesinden kaynaklandığını ve oluşan seramiğin  $Al_2O_3$  birleşme oranlı olması varsayımı üzerinden ilişkilendirilmiştir.

Açık gözenekli alüminyum köpük numunelerin PEO işleminden önce ve değişik kaplama sürelerinden sonra kütleleri tartılarak metal/seramik dönüşüm oranı değerleri hesaplanmıştır.

## 7.6. Yoğunluk Ölçümü

PEO ile yüzey kaplama işlemi öncesi ve sonrasında, Duocel köpük numunelerin yoğunluk, bağıl yoğunluk ve % gözenek miktarları tespit edilmiştir. Bağıl yoğunluk, numune ağırlığının ve hacminin ölçülmesinden ve  $2.7 \text{ g/cm}^3$  alüminyumun yoğunluğuna bölünerek ölçülmüştür. Numunelerin % gözenek miktarları aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmıştır [Bafti and Habibolahzadeh, 2010].

$$\text{Gözeneklilik (P)} = 1 - \left( \frac{\rho_{kp}}{\rho_{al}} \right) \times 100 \quad (7.2)$$

Eşitlik 7.2’de P gözenekliliği,  $\rho_{kp}$  köpük yoğunluğunu ve  $\rho_{al}$  alüminyum yoğunluğunu ifade etmektedir.

PEO ile yüzeyleri kaplandıktan sonra gözeneklerine alüminyum infiltre edilerek üretilen kompozit levhaların ağırlıklarının hacimlerine bölünmesi ile özgül ağırlıkları aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7.3)$$

Eşitlik 7.3’te  $\rho$  özgül ağırlığı, m ağırlığı ve V ise hacmi ifade etmektedir.

Üretilen kompozit levha numunelerinin yoğunlukları Arşimet yöntemi ile ölçülmüştür ve aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır [Prasad et al., 2014].

$$d_k = \frac{m_{kuru}}{m_{yaş} - m_{askı}} * d_{su} \quad (7.4)$$

Eşitlik 5.4'te  $d_k$  kompozit yoğunluğunu,  $m_{kuru}$  kompozitin kuru ağırlığını,  $m_{yaş}$  kompozitin yaş ağırlığını,  $m_{askı}$  kompozitin suyun içinde askıda kalan ağırlığını ve  $d_{su}$  suyun yoğunluğunu ifade etmektedir.

## 7.7. Mekanik Testler

### 7.7.1. Basma Testi

6101-T6 ve 6061-T6 alüminyum alaşımı açık gözenekli köpük malzemelere PEO yöntemi işleminden önce ve sonra tek eksenli basma testi uygulanmıştır. Basma testi için 6101 alaşımı köpük malzemelerden 20 mm x 20 mm x 10 mm boyutlarında ve 6061 alaşımı köpük malzemelerden 18 mm x 18 mm x 6 mm boyutlarında numuneler su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır. Tüm numunelere şekil 7.4'te gösterilen 10 kN yük kapasitesine sahip Instron marka AGS-X test cihazı kullanılarak BS ISO 13314:2011 standardına göre [BS ISO, 2011] 0,5 mm/dakika hızında basma testi en az iki kez tekrarlanarak uygulanmıştır.



Şekil 7.4: Basma testlerinde kullanılan Instron AGS-X test cihazı.

Gerilme-gerinim eğrisinde tepe gerilme noktası numunenin basma mukavemeti olarak belirlenmiştir. Akma gerilmesi, gerilme-gerinim eğrisinden doğrusal elastik bölgesine paralel olarak, orijinal eğri ile kesişen %0,2 plastik gerinim noktasından bir çizgi çizilerek ölçülmüş, elastik modülü, gerilme-gerinim eğrisinden elastik deformasyon bölgesindeki eğrinin eğimi alınarak ölçülmüş, akma gerilmesinin numune yoğunluğuna bölünmesiyle hesaplanmış ve tablolar halinde verilmiştir. Basma mukavemeti (Eşitlik 7.5), % birim şekil değiştirme (Eşitlik 7.6) ve enerji sönümleme (Eşitlik 7.7.) değerleri aşağıda verilen eşitlikler ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A} \quad (7.5)$$

Eşitlik 5.5'te  $\sigma_b$  basma gerilmesini,  $F_b$  numuneye uygulanan basma kuvvetini,  $A$  numunenin başlangıç kesit alanını ifade etmektedir.

$$\% \varepsilon_b = [(h_1 - h_0)/h_0] * 100 \quad (7.6)$$

Eşitlik 5.6'da  $\varepsilon_b$  yüzde birim şekil değiştirmeyi,  $h_1$  numunenin basma testi sonundaki yüksekliğini,  $h_0$  numunenin basma testi öncesi yüksekliğini ifade etmektedir.

$$W_V = \frac{1}{100} \int_0^{e_0} \sigma d_e \quad (7.7)$$

Eşitlik 5.7'de  $W_V$  birim hacim başına düşen soğurulan enerjiyi,  $\sigma_b$  basma gerilmesini,  $e_0$  basma gerilmesi için belirlenen üst limiti ifade etmektedir.

### 7.7.2. Üç Nokta Eğme Testi

A383 alüminyum alaşımının infiltrasyonu ile üretilen kompozit levhaların eğme mukavemet değerleri, Şekil 7.5'de gösterilen 10 kN yük kapasitesine sahip Instron marka AGS-X test cihazı kullanılarak BS EN ISO 7438:2005 standardına göre [BS EN ISO, 2005] üç nokta eğme testleri ile belirlenmiştir. Üç nokta eğme testi kompozit

levhalardan 56 mm x 20 mm x 6 mm boyutlarında su jeti ile kesilen numunelere 0,5 mm/dakika hızında uygulanmıştır.



Şekil 7.5: Üç nokta eğme testlerinde kullanılan Instron marka AGS-X test cihazı.

Üç nokta eğme testlerinde maksimum kırılma yükleri değerlendirilmiştir. Kilogram değerleri eğilme gerilimi (MPa) değerlerine dönüştürülmüştür. Eğilme gerilimi aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmıştır [Kalkanlı and Yılmaz, 2008].

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (7.8)$$

Eşitlik 7.8’de  $\sigma$  Eğilme gerilimini,  $M$  eğilme momentini,  $y$  doğal eksen den uzaklık ve  $I$  atalet momentini ifade etmektedir. Maksimum eğilme yüzey gerilimi numunenin orta noktasında meydana gelmektedir. Bu nedenle, eğilme momenti ( $M$ ) şu şekilde verilmektedir [Kalkanlı and Yılmaz, 2008]:

$$M = P * L/4 ; y = t/2; I = b * t^3/12 \quad (7.9)$$

$$\sigma_{maks} = (3 * P * L)/(2 * b * t^2) \quad (7.10)$$

Eşitlik 7.9 ve Eşitlik 7.10’da P test cihazı tarafından uygulanan yükü, t numune kalınlığını, b numune genişliğini ve L mesnetler arası uzaklığı ifade etmektedir. Mesnetler arası mesafe 40 mm olarak sabitlenmiştir.

### 7.7.3. Ağırlık Düşürme Darbe Testi

A383 alüminyum alaşımının infiltrasyonu ile üretilen kompozit levhalara Şekil 7.6’da gösterilen ağırlık düşürme sistemiyle çalışan Instron Dynatup 9250HV darbe test cihazında, Şekil 7.7’de görülen 16 mm çapında yarı küresel darbe ucuyla 15 J, 45 J, 120 J ve 140 J enerji düzeylerinde darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Darbe yüklemesi için tüm testlerde toplam 25,84 kg ağırlık kullanılmıştır. Darbe yüklemelerinden sonra, darbe test cihazına bağlı olan “Impulse Data Acquisition” yazılımından grafikler elde edilmiştir. Tablo 7.6’da ağırlık düşürme darbe testi uygulanan kompozit levhalara ve A383 alüminyum alaşımı levhalara ait darbe test değişkenleri ve numune bilgileri verilmektedir.



Şekil 7.6: Instron 9250 HV darbe test cihazı.



Şekil 7.7: Darbe testlerinde kullanılan, 16mm çaplı yarı küresel darbe ucu.

Tablo 7.6: Darbe testlerinde kullanılan A383 alüminyum alaşımı ile kompozit levhaların numune bilgileri ve darbe enerji düzeyleri.

| Malzeme        | Gözeneklilik Oranı (ppi) | PEO Kaplama Süresi (dakika) | Darbe Test Yüksekliği (m) | Darbe Enerjisi (J) | Darbe Hızı (m/s) | Numune Genişliği (mm) | Numune Kalınlığı (mm) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| A383 Levha     | -                        | Kaplamasız                  | 0,06                      | 15                 | 1,05             | 64                    | 5,81                  |
|                |                          |                             | 0,18                      | 45                 | 1,84             | 64                    | 5,74                  |
|                |                          |                             | 0,47                      | 120                | 2,99             | 64                    | 5,83                  |
|                |                          |                             | 0,55                      | 140                | 3,24             | 64                    | 5,86                  |
| Kompozit Levha | 20                       | 30                          | 0,06                      | 15                 | 1,05             | 64                    | 5,72                  |
|                |                          | 60                          |                           |                    | 1,04             | 64                    | 5,4                   |
|                |                          | 90                          |                           |                    | 1,05             | 64                    | 5,67                  |
|                |                          | 30                          |                           |                    | 1,83             | 64                    | 5,53                  |
|                |                          | 60                          | 0,18                      | 45                 | 1,83             | 64                    | 5,31                  |
|                |                          | 90                          |                           |                    | 1,83             | 64                    | 5,52                  |
|                |                          | 30                          |                           |                    | 1,05             | 64                    | 5,58                  |
|                |                          | 60                          |                           |                    | 1,05             | 64                    | 5,76                  |
|                | 40                       | 90                          | 0,06                      | 15                 | 1,05             | 64                    | 5,68                  |
|                |                          | 30                          |                           |                    | 1,83             | 64                    | 5,77                  |
|                |                          | 60                          |                           |                    | 1,83             | 64                    | 5,24                  |
|                |                          | 90                          |                           |                    | 1,83             | 64                    | 5,77                  |
|                |                          | 60                          | 0,18                      | 45                 | 2,99             | 64                    | 5,66                  |
|                |                          | 90                          |                           |                    | 3,24             | 64                    | 6,12                  |
|                |                          | 30                          |                           |                    | 1,05             | 64                    | 5,58                  |
|                |                          | 60                          |                           |                    | 1,05             | 64                    | 5,76                  |

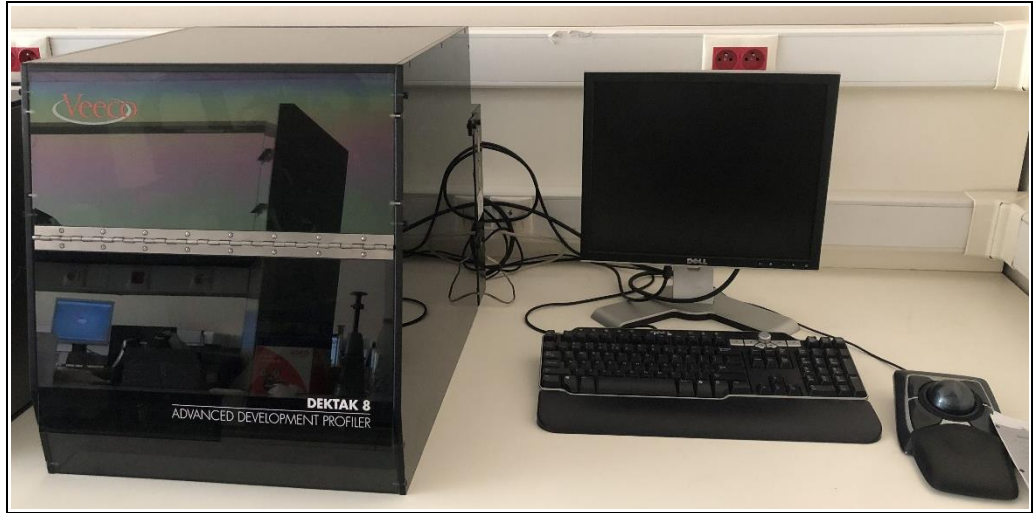
#### 7.7.4. Aşınma Testi

Nihai olarak üretilen kompozit levhaların aşınma davranışlarını ve sürtünme katsayısını ölçmek için Şekil 7.8’de gösterilen CSM Tribometer marka aşınma test cihazı kullanılmıştır. Her bir numune 2 N yük altında 0,1 m/s kayma hızında toplam 100 m mesafe boyunca ve 6 mm çapında Inox 440C çelik bilye kullanılarak, kuru sürtünme ortamında aşındırılmıştır. Aşınma izleri Şekil 7.9’da gösterilen Veeco

Dektak 8 marka profilometre cihaz kullanılarak ölçülmüştür. Her bir numune için 1000  $\mu\text{m}$  x 1000  $\mu\text{m}$  lik alanlarda aşınma izleri taranarak ortalama değerleri ölçülmüş ve bu değerler aşınma cihazı yazılımına girilerek aşınma miktarları tespit edilmiştir.



Şekil 7.8: CSM Tribometer marka aşınma test cihazı.

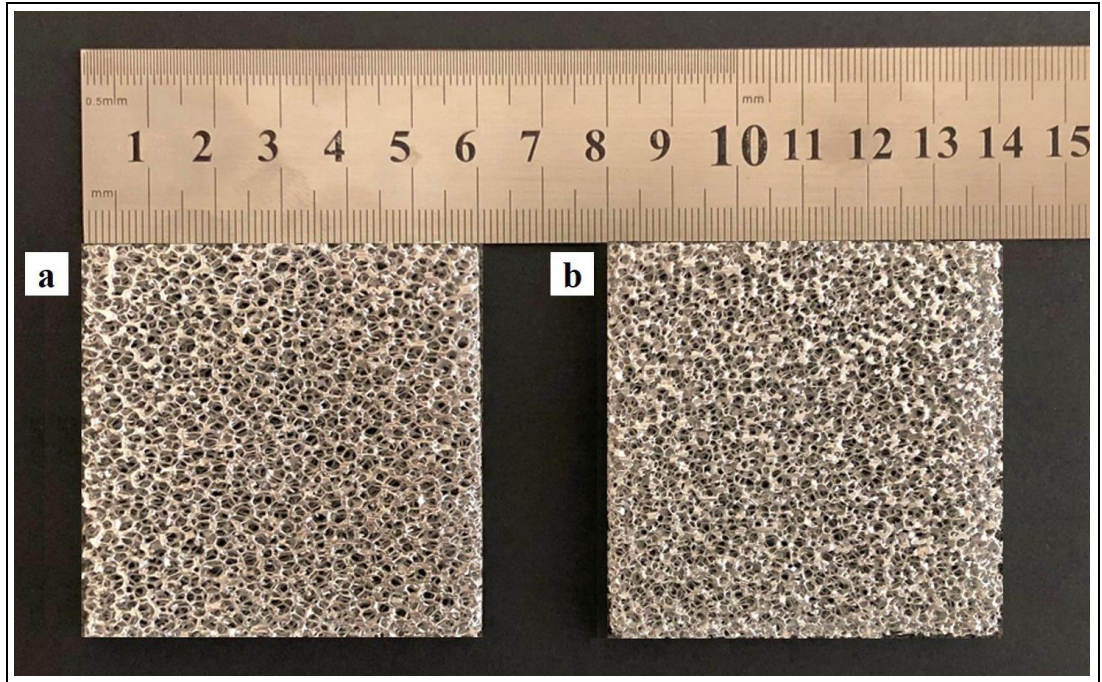


Şekil 7.9: Veeco Dektak 8 marka profilometre cihazı.

## 8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 8.1. Makro Görüntü İnceleme Sonuçları

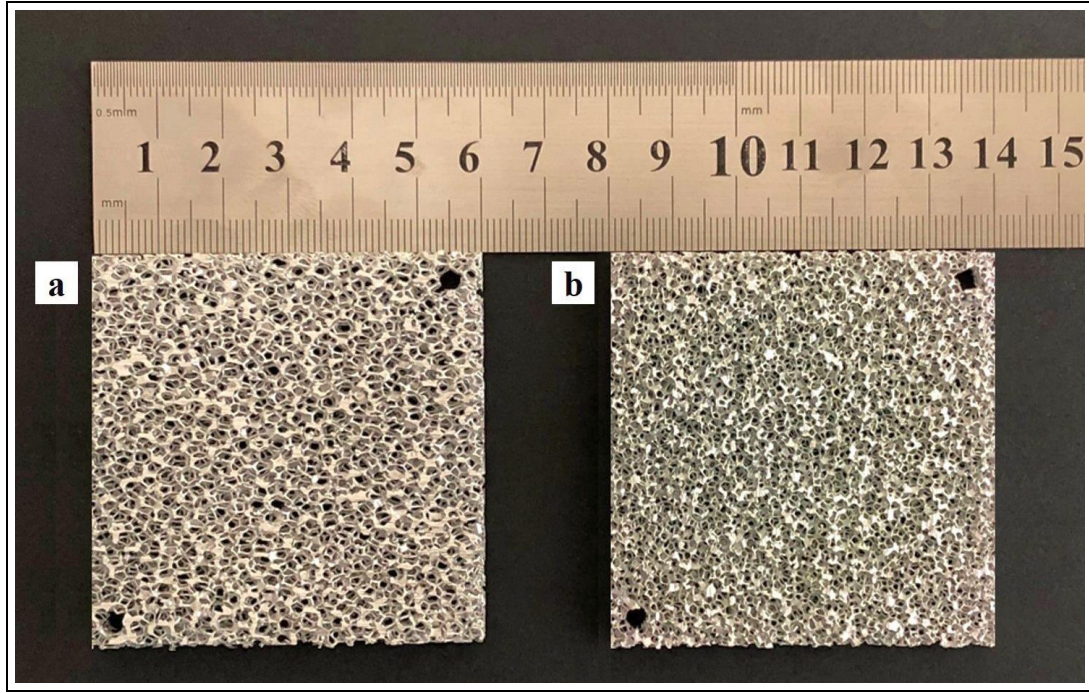
Alüminyum köpük malzemeler, yaklaşık olarak dairesel kesitli ince alüminyum kırıntı ağlarının oluşturduğu açık gözenekli yapılardır. Deneylerde kullanılan açık gözenekli alüminyum köpük malzemelerden Şekil 8.1’de gösterilen 6101 alüminyum alaşımına ait makro görüntüde 20 ppi gözenek yoğunluğunda görülen gözenek dağılımı boyutsal olarak daha büyükken, 40 ppi gözenek yoğunluğunda görülen gözenek dağılımı boyutsal olarak daha küçüktür. Ortalama makro görüntüsü değerlendirilmesinde homojen bir yapı olduğu görülmektedir.



Şekil 8.1: 6101 alüminyum alaşımı köpük malzemenin a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarına ait makro görüntüleri.

Şekil 8.2’de 6061 alüminyum alaşımına ait makro görüntüde 20 ppi gözenek yoğunluğunda görülen gözenek dağılımı boyutsal olarak daha büyükken 40 ppi gözenek yoğunluğunda görülen gözenek dağılımı boyutsal olarak daha küçüktür. Ortalama makro görüntüsü değerlendirilmesinde homojen bir yapı olduğu görülmektedir. Her iki alüminyum alaşımının kimyasal bileşimleri farklı olmasına

rağmen gözenek tipi, dağılımı ve kiriş ağların oluşturduğu açık gözenekler dairesel kesitli ince görünümü ile benzerlik göstermektedirler.



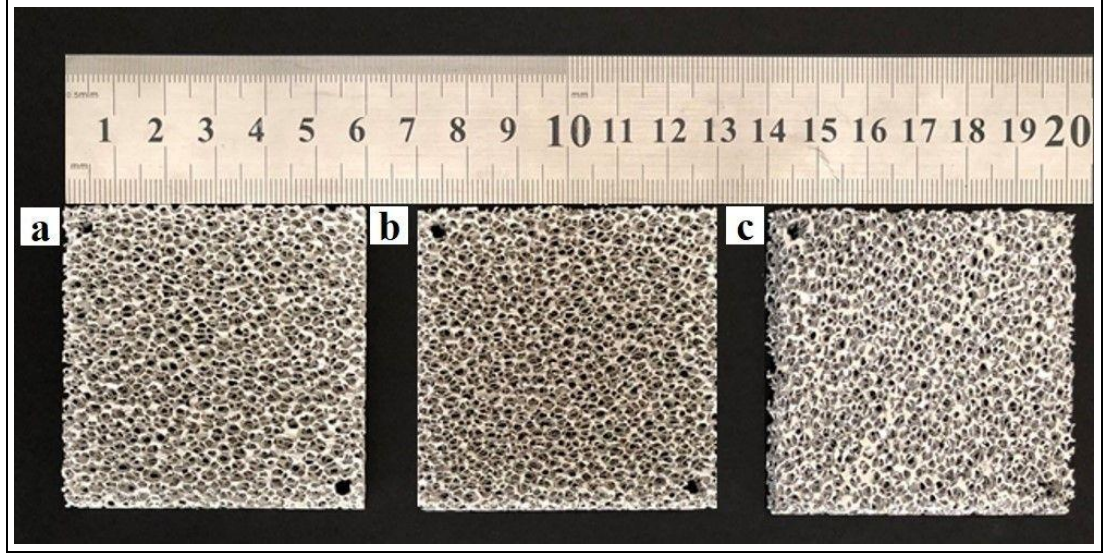
Şekil 8.2: 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemenin a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarına ait makro görüntüleri.

### 8.1.1. PEO Yöntemi ile Üretilen Kaplamaların Makro Görüntü İnceleme Sonuçları

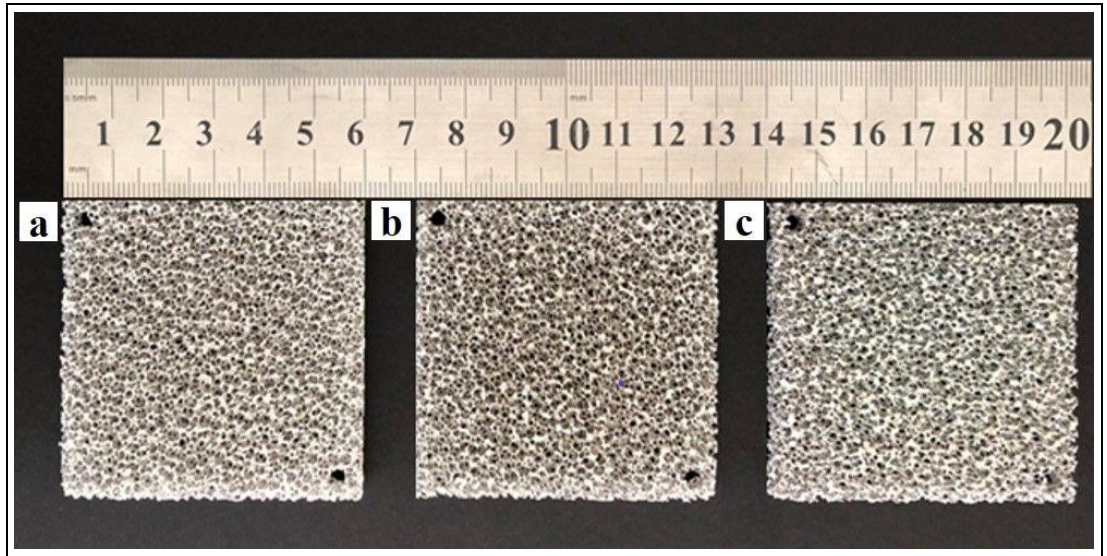
Şekil 8.3'te ve Şekil 8.4'te 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemelerin yüzeyinde PEO yöntemi ile 30 dakika, 60 dakika ve 90 dakika kaplama işlemleri sonrası makro görüntüleri gösterilmektedir. 6101 alaşımı alüminyum köpük malzemelerin 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluklarında da benzer makro görüntüler mevcuttur. PEO kaplama işleminden sonra altlık malzeme alüminyum alaşımları köpüklerin dairesel kesitli kiriş yüzeylerinde seramik kaplama oluşturulmuştur. Sonuç olarak, birbirine bağlı olan seramik-metal-seramik yapıli kirişlerin oluşturduğu gözenekli hücreli katı yapı elde edilmiştir. Makro görüntülere bakıldığında kaplama oluşumu nedeniyle açık gözeneklerin boyutlarında küçülme meydana gelmektedir.

6101 alüminyum alaşımı köpüklerin makro görüntüsü incelendiğinde Şekil 8.3 ve Şekil 8.4'te gösterilen makro görüntüler ile aynı şekilde benzer olduğu görülmüştür.

PEO kaplama işlemlerinden sonra elde edilen yapılar üzerinde kompozit levhalar geliştirilmiştir.



Şekil 8.3: 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemelerin a) 30 dakika, b) 60 dakika ve c) 90 dakika PEO işlemi sonrası görüntüleri.

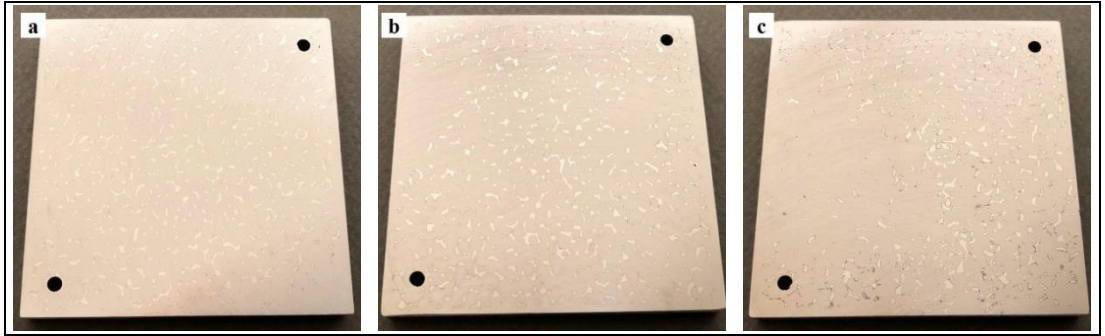


Şekil 8.4: 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemelerin a) 30 dakika, b) 60 dakika ve c) 90 dakika PEO işlemi sonrası görüntüleri.

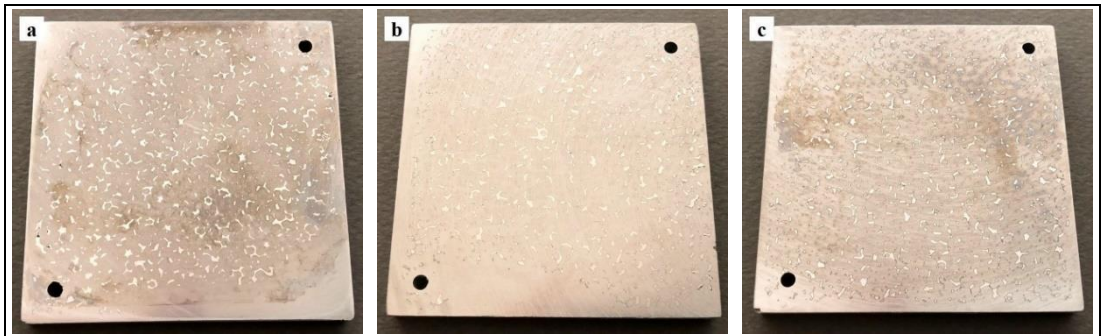
### 8.1.2. İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilen Kompozit Levhaların Makro Görüntü İnceleme sonuçları

Yüzeyleri seramik kaplanan, seramik-metal-seramik kirişli köpük yapılar vakum destekli basınçlı döküm yöntemi kullanılarak A383 alüminyum alaşımının infiltrasyonu ile kompozit levhalar üretilmiştir. İnfiltrasyon işlemi PEO yöntemi ile yüzeyi seramik kaplanan 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemelere uygulanmıştır. Şekil 8.5 ve Şekil 8.6’da 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki alüminyum köpüklere PEO yöntemi ile 30 dakika, 60 dakika ve 90 dakika kaplama işlemleri sonrası gözeneklerine A383 alüminyum alaşımının infiltrasyonu ile elde edilen kompozit levhaların makro görüntüleri gösterilmektedir.

İnfiltrasyon yöntemi ile üretilen kompozit levhaların makro görüntü analiz sonuçlarına bakıldığında tüm açık gözeneklerin A383 alüminyum alaşımı ile infiltre edilmiş olduğu görülmektedir. Özellikle dökümlerin kenar kısımlarında makro düzeydeki görüntüde A383 alüminyum alaşımının tam olarak infiltre edilmediği bölgeler de görülmüştür. Nihai üretilen kompozit levhalara diğer analizler yapılmıştır.



Şekil 8.5: 20 ppi için a) 30 dakika, b) 60 dakika ve c) 90 dakika PEO işlemi sonrası vakum destekli basınçlı döküm yöntemi ile üretilen kompozit levhaların görüntüleri.

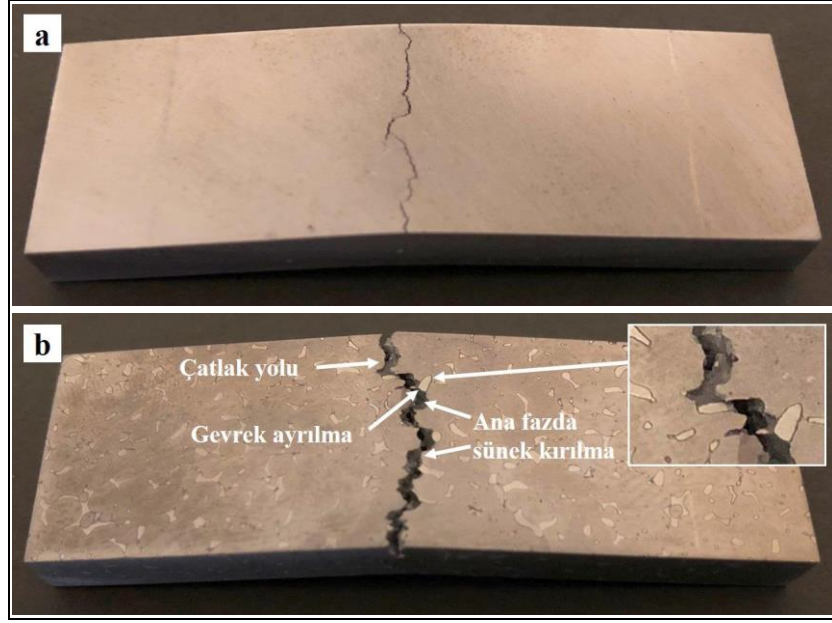


Şekil 8.6: 40 ppi için a) 30 dakika, b) 60 dakika ve c) 90 dakika PEO işlemi sonrası vakum destekli basınçlı döküm yöntemi ile üretilen kompozit levhaların görüntüleri.

### 8.1.3. İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilen Kompozit levhaların Üç Nokta Eğme Testi Sonrası Makro Görüntü İnceleme Sonuçları

Şekil 8.7’de üç nokta eğme testi sonrası A383 alüminyum alaşımı levha ve kompozit levhaların alt yüzeylerinin makroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Kompozit levhalar, eğme yüklemesi eksenine normal olarak meydana gelen, makroskobik bir ölçekte sünek ve kırılma mekanizmalarını anımsatan kırık yüzey görünümleri sergilemektedir. A383 alüminyum alaşımı levhanın alt yüzey makro görüntüsüne bakıldığında sünek bir malzemenin kırılma yüzeyine (yırılma sırtları ve mikroskobik boşluklar içeren gamzeli kopma) sahip olduğu görülmektedir (Şekil 8.7a). Sünek kırılmaların genel makroskobik görünümü, çoğu zaman, kırılma konumunda çok sayıda ayrılmış parça veya önemli çatlak dallanması olmaksızın tek çatlaklar olarak ilerlemektedir [Liu, 2005]. Kompozit levhaların alt yüzey makro görüntüsünde ise kırılma mekanizmasının ana fazdan PEO kaplamanın ayrılması ile gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 8.7b). Çoğu durumda, PEO kaplamanın parçaları 6061 alüminyum alaşımına bağlı kalırken, kaplamanın geri kalanı ana faz A383 alüminyum alaşımı üzerinde kalmaktadır. Benzer kırılma mekanizmasının alüminyum alaşımının döküm ve çeliğin toz metalürjisi yöntemleri kullanılarak içi boş çelik küre yığınları arasına infiltre edilmesi ile üretilen alüminyum-çelik ile çelik-çelik kompozit metal köpüklerin eğme testi sonrasında olduğu gözlemlenmektedir [Brown et al., 2010]. Yükleme maksimum gerilmeyi geçerek devam ederken, PEO kaplamada başlayan bireysel mikro çatlaklar, yakındaki PEO kaplamalardaki diğer mikro çatlaklarla bağlantı kurmak için ana faz boyunca yayılmaktadır. Bu süreç, sonuçta, PEO kaplamalar ve ana faz arasındaki ara yüzeylerde PEO kaplamadan PEO kaplamaya doğru bir yol izleyen malzemede makroskobik bir çatlak üretmektedir.

Gevrek kırılmada, sünek kırılmanın aksine, az veya hiç makroskobik plastik biçim değiştirme ile karakterize edilmektedir. Gevrek kırılma, sünek kırılmadan daha kolay başlamakta ve yayılmaktadır. Gevrek kırılmanın makroskobik davranışı, kırılma noktasına kadar temelde elastiktir. Kırılmanın enerjisi esas olarak yeni yüzeylerin, yani çatlakların yaratılmasıyla emilmektedir.

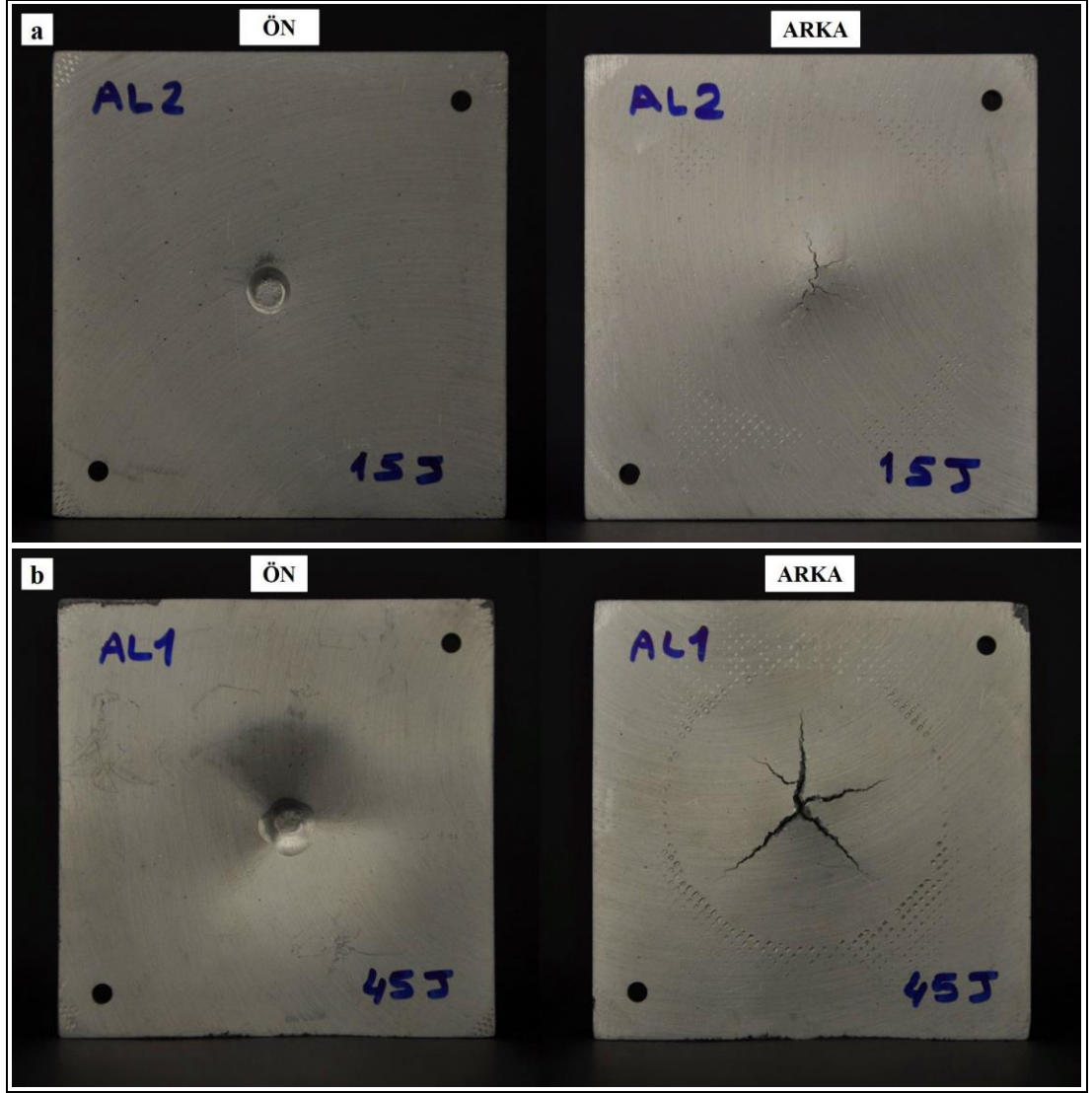


Şekil 8.7: a) A383 alüminyum alaşımı levha ve b) 90 dakika PEO işlemi sonrası vakum destekli basınçlı döküm yöntemi ile üretilen kompozit levhanın eğme kırık yüzeyi makro görüntüleri.

#### 8.1.4. İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilen Kompozit Levhaların Ağırlık Düşürme Darbe Testi sonrası Makro Görüntü İnceleme Sonuçları

Şekil 8.8’de A383 alüminyum alaşımı levhaların, Şekil 8.9 ile Şekil 8.10’da 20 ppi gözenek yoğunluğunda 30, 60 ve 90 dakika kaplama süreleri için üretilen kompozit levhaların ve Şekil 8.11 ile Şekil 8.12’de 40 ppi gözenek yoğunluğunda 30, 60 ve 90 dakika kaplama süreleri için üretilen kompozit levhaların 15 J ve 45 J darbe enerjileri sonrası ön ve arka yüz makro görüntüleri gösterilmektedir. Çeşitli enerji düzeylerinde etkilenen levhalar için farklı hasar düzeyleri elde edilmiştir. Darbe enerjisi düşük olduğunda (15 J), darbe ucu levhaların ön yüzlerinde batma izi; arka yüzlerinde ise küçük çatlaklar oluşturmaktadır. Ancak, levhalarda önemli bir kütleli biçim değiştirme meydana gelmemektedir. Darbe enerjisi artırıldığında (45 J), ön yüzde biçim değiştirme ve arka yüzde ise çatlak boyutunda artma ortaya çıkmaktadır.

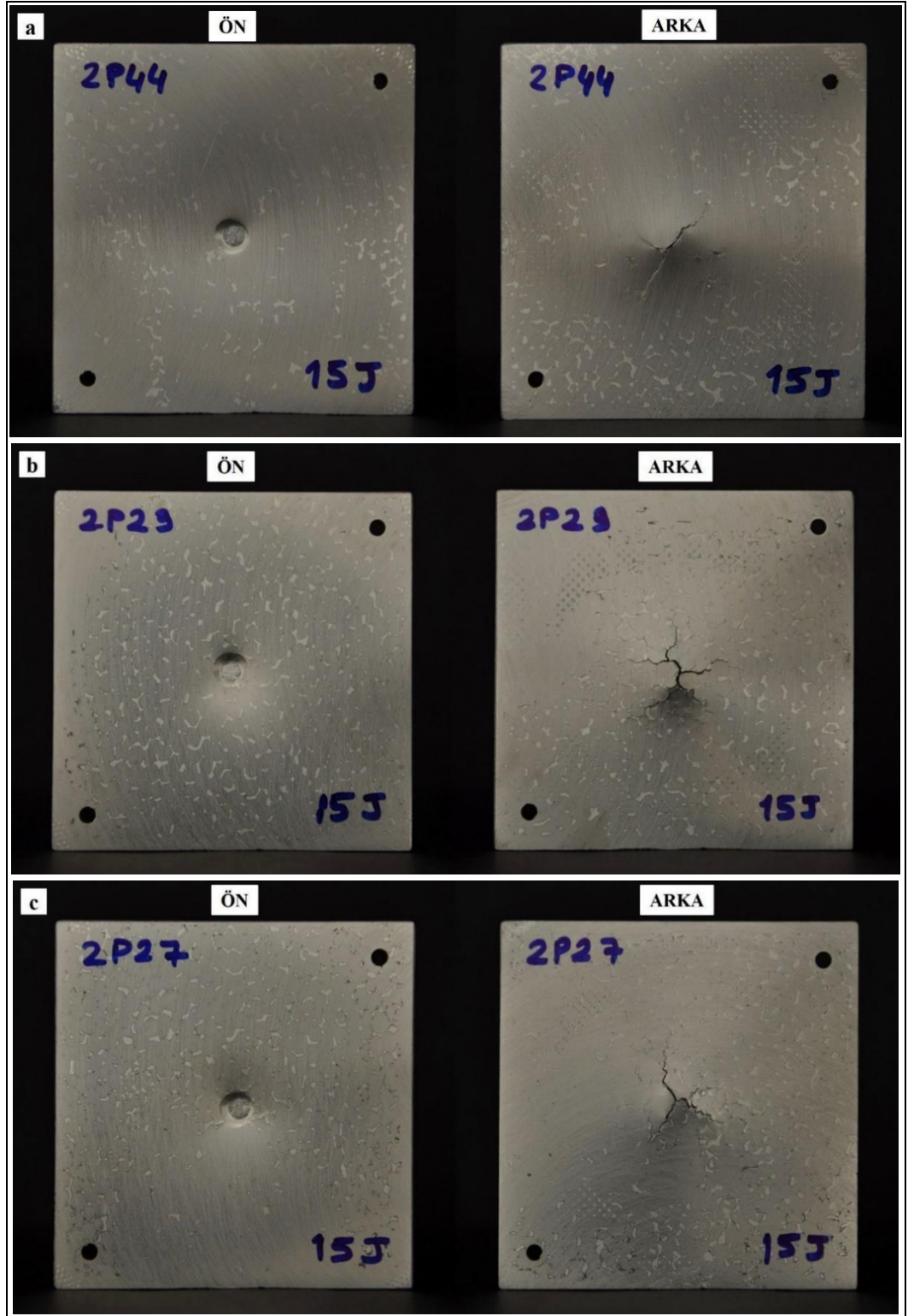
Şekil 8.8’de A383 alüminyum alaşımı levhalarına uygulanan 15 J darbe enerjisinde, darbe ucunun alüminyum levha ile temas etmesi sonucunda ön yüzde batma izi ve arka yüzde küçük boyutta çatlaklar oluşmaktadır. 45 J darbe enerjisinde ise levhanın ön yüzünde sünek biçim değiştirme ile çökme ve arka yüzünde de çatlakların boyutunda ve uzunluğunda artış gerçekleştiği görülmektedir.



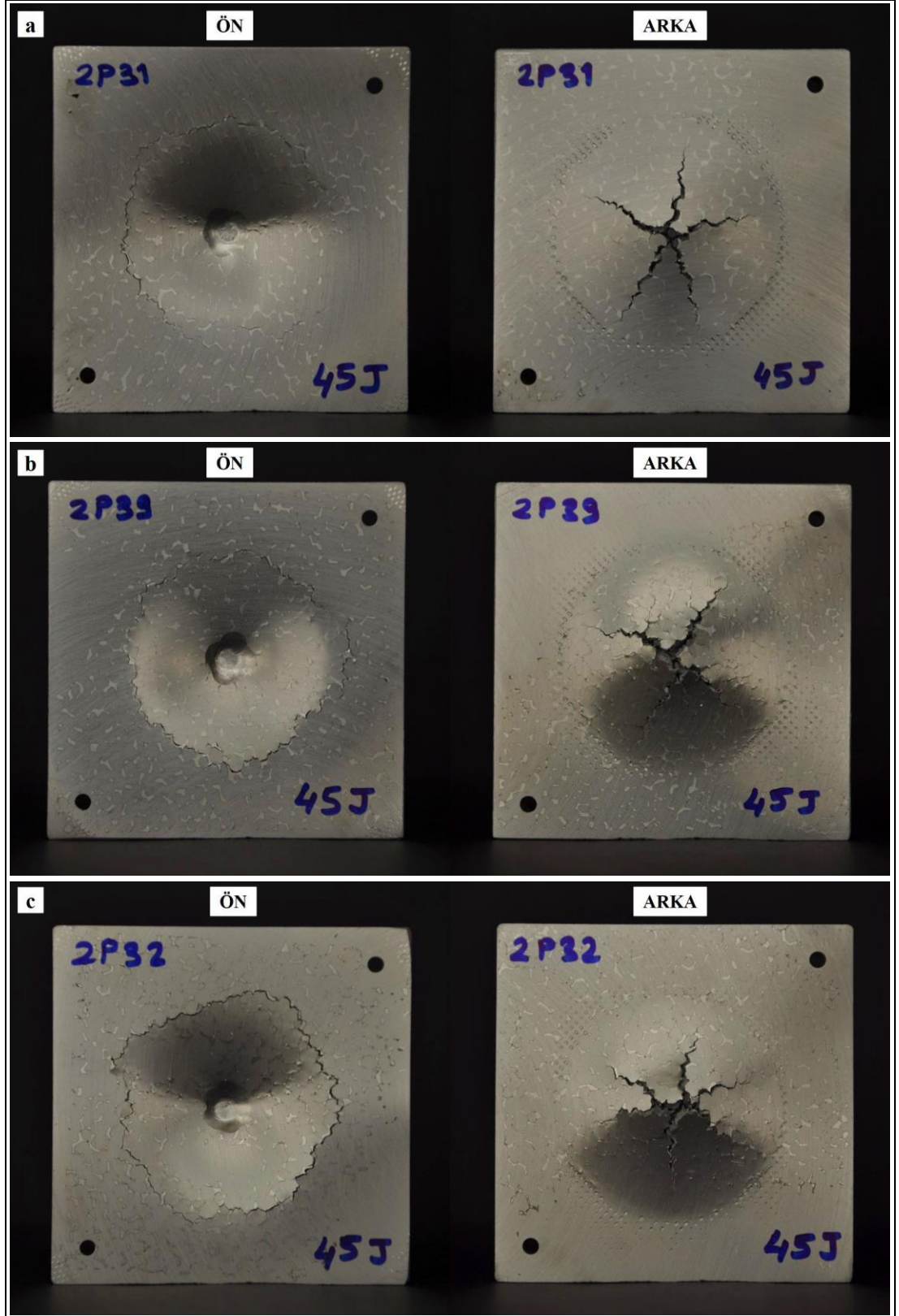
Şekil 8.8: A383 alüminyum alaşımı levhalara uygulanan a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri sonrası ön ve arka makro görüntüleri.

Şekil 8.9’da 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 15 J darbe enerjisi uygulaması sonrası 30, 60 ve 90 dakika kaplama süreleri için ön ve arka yüz makro görüntüleri verilmektedir. Buna göre, kompozit levhaların ön yüzlerinde batma izi mevcutken levhaların arka yüzlerinde çatlakların oluştuğu görülmektedir. 60 dakika kaplama süresi için darbe ucu levhaya daha fazla nüfuz etmektedir. Şekil 8.10’da 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 45 J darbe enerjisi uygulaması sonrası 30, 60 ve 90 dakika kaplama süreleri için ön ve arka yüz makro görüntüleri verilmektedir. Buna göre, kompozit levhaların ön yüzlerinde batma izi ile çökme mevcutken, darbe ucunun levha ile temas ettiği noktanın çevresinde dairesel çatlak oluşumu ve ilerlemesi gözlenmektedir. Levhaların arka yüzlerinde ise artan ve boyutları değişen çatlakların oluştuğu görülmektedir. 45 J

darbe enerjisinde 60 ve 90 dakika kaplama süreleri için darbe ucu levhaya daha fazla nüfuz etmektedir.

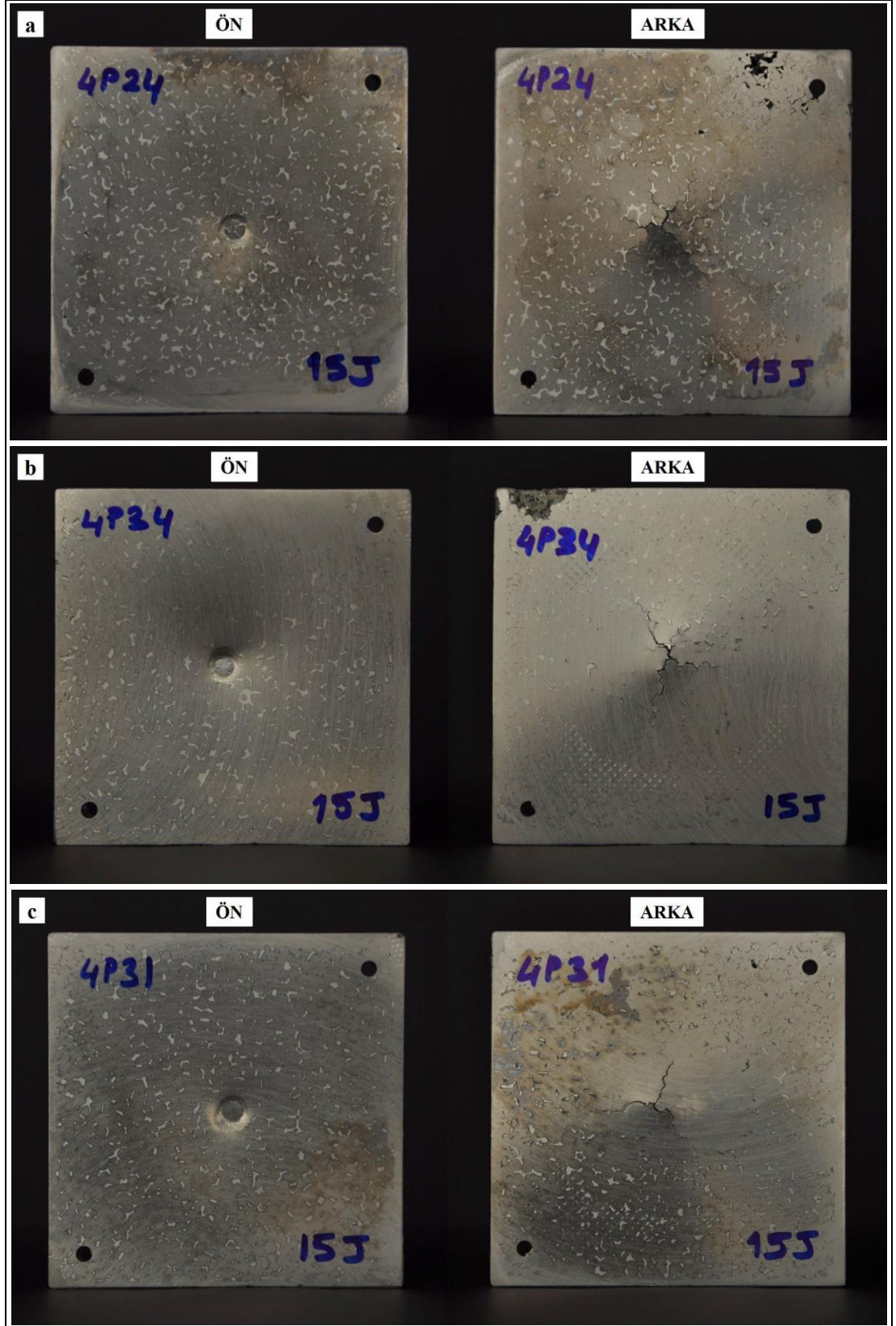


Şekil 8.9: 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 15 J darbe enerjisi uygulaması sonrası a) 30 dakika, b) 60 dakika c) 90 dakika kaplama sürelerinde ön ve arka yüz makro görüntüleri.

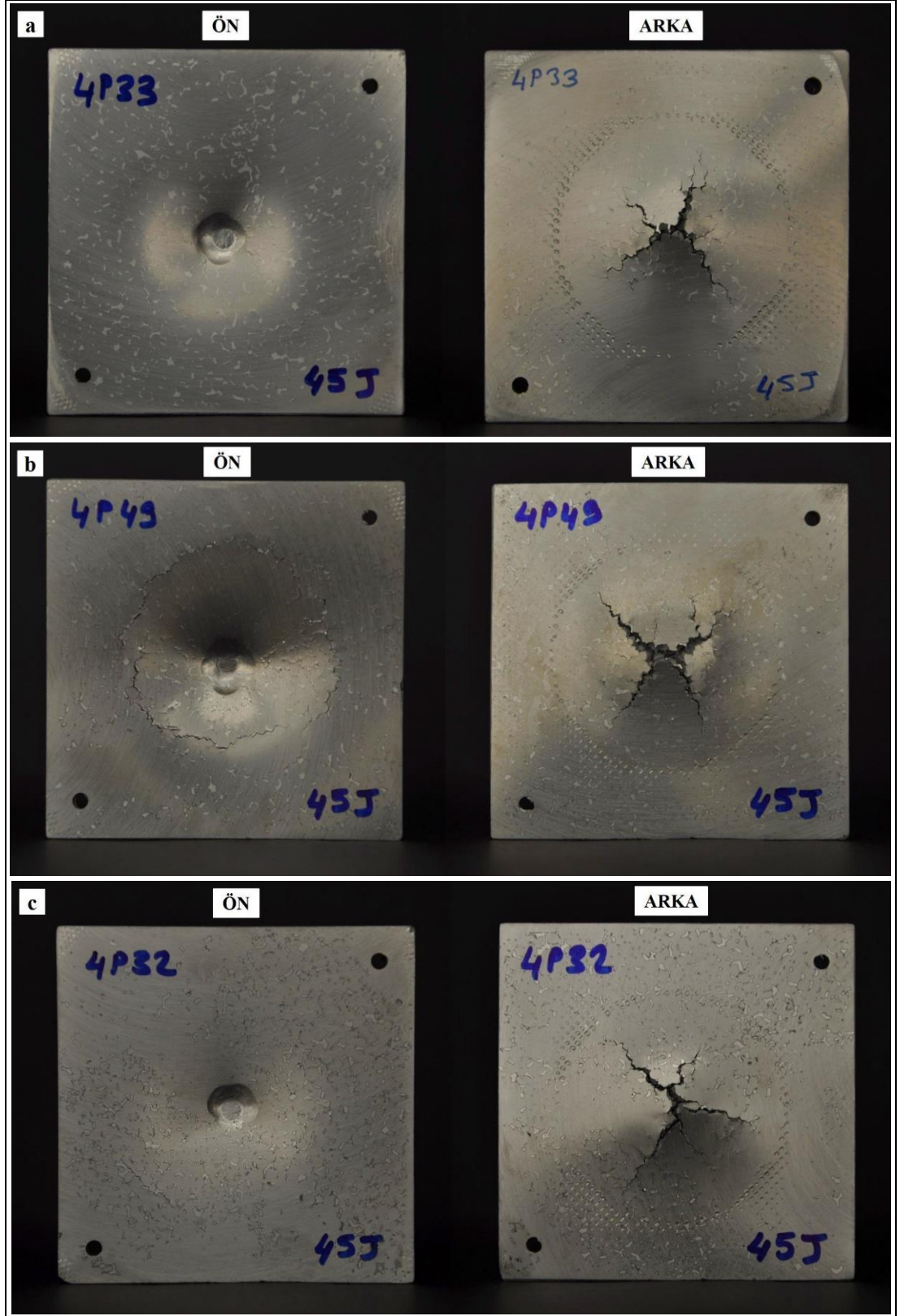


Şekil 8.10: 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 45 J darbe enerjisi uygulaması sonrası a) 30 dakika, b) 60 dakika c) 90 dakika kaplama sürelerinde ön ve arka yüz makro görüntüleri.

Şekil 8.11’de 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 15 J darbe enerjisi uygulaması sonrası 30, 60 ve 90 dakika kaplama süreleri için ön ve arka yüz makro görüntüleri verilmektedir. Buna göre, kompozit levhaların ön yüzlerinde batma izi mevcutken levhaların arka yüzlerinde çatlakların oluştuğu görülmektedir. 20 ppi gözenek yoğunluğunda üretilen kompozit levhalar ile karşılaştırıldığında çatlak boyutlarının daha küçük boyutta olduğu gözlenmektedir. Şekil 8.12’de 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 45 J darbe enerjisi uygulaması sonrası 30, 60 ve 90 dakika kaplama süreleri için ön ve arka makro görüntüleri verilmektedir. Buna göre, 30 ve 90 dakika kaplama süreleri için levhanın ön yüzünde batma izi ve çökme görülürken arka yüzünde çatlak oluşmaktadır (Şekil 8.12a ve Şekil 8.12c). 60 dakika kaplama süresi için batma izi ve çökme ile dairesel bir çatlak ilerlemesi bulunurken levhanın arka yüzünde çatlak boyutu artmaktadır (Şekil 8.12b). Darbe ucunun nüfuz etme durumu 15 J darbe enerjisinde 30 dakika kaplama süresi için; 45 J darbe enerjisinde ise 60 dakika kaplama süresi için en fazla olmaktadır.

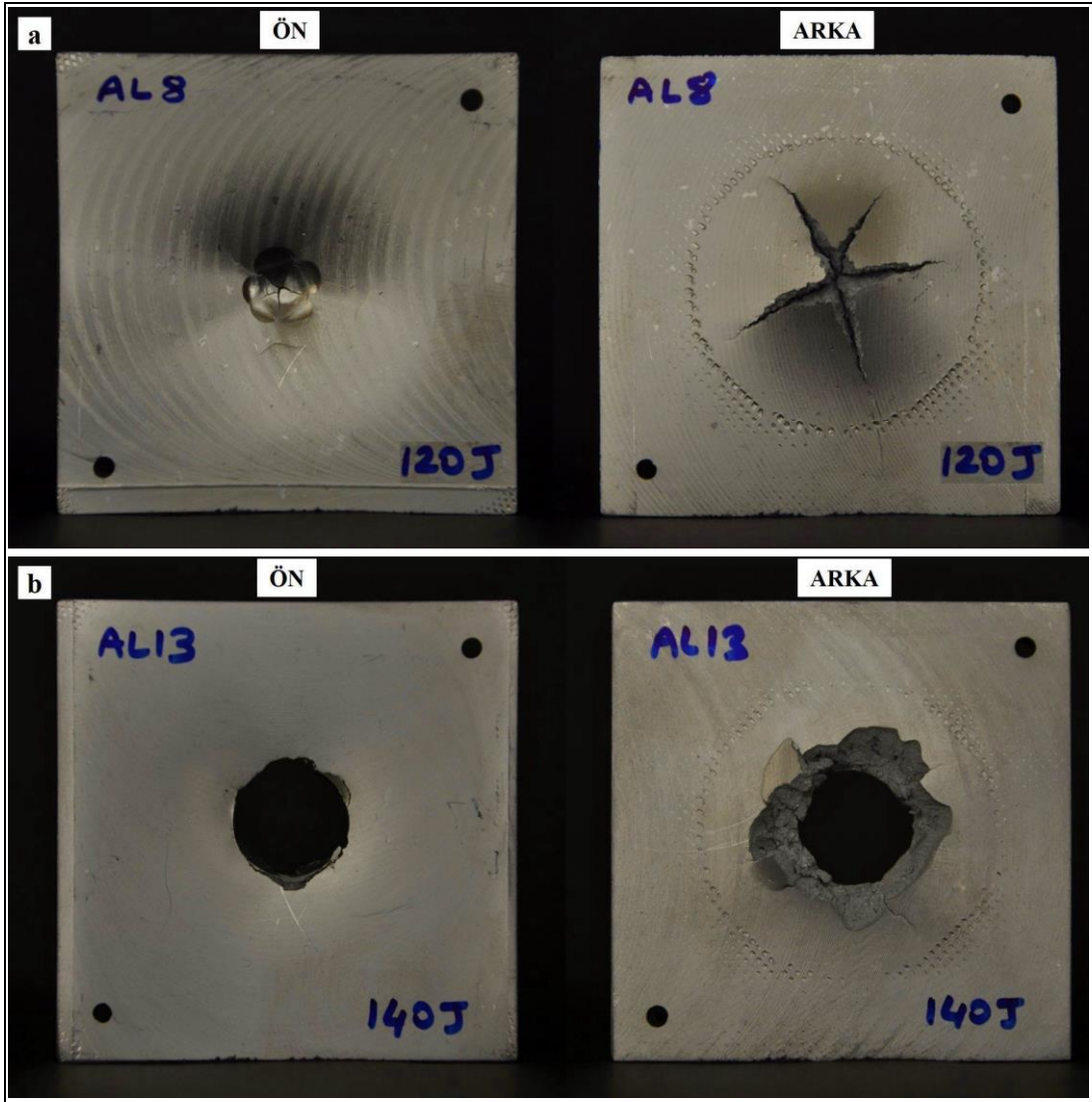


Şekil 8.11: 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 15 J darbe enerjisi uygulaması sonrası a) 30 dakika, b) 60 dakika c) 90 dakika kaplama sürelerinde ön ve arka yüz makro görüntüleri.



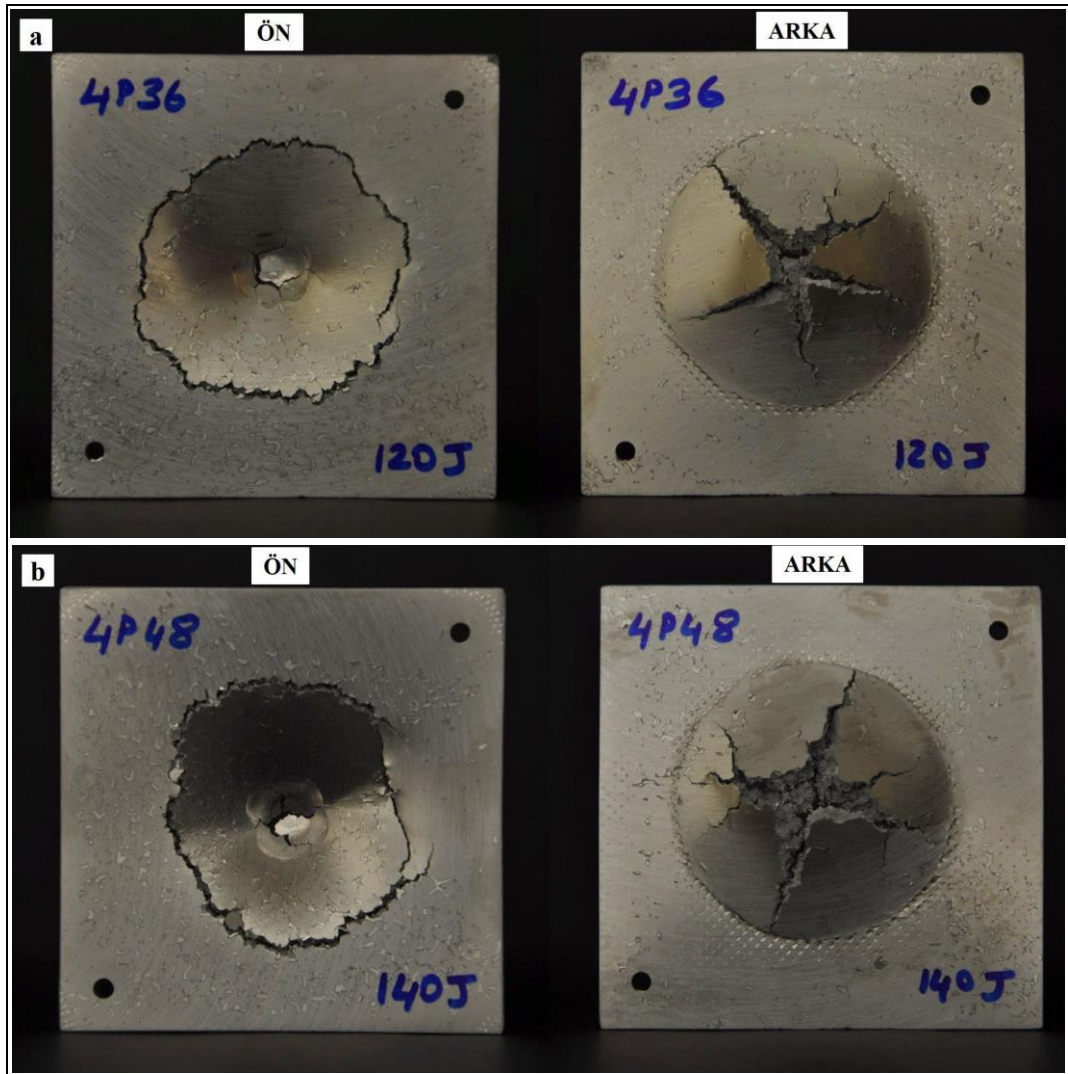
Şekil 8.12: 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 45 J darbe enerjisi uygulaması sonrası a) 30 dakika, b) 60 dakika c) 90 dakika kaplama sürelerinde ön ve arka yüz makro görüntüleri.

Şekil 8.13 ve Şekil 8.14'te A383 alüminyum alaşımı levhalara ve 40 ppi gözenek yoğunluğunda 90 dakika süreyle seramik kaplandıktan sonra gözeneklerine A383 alüminyum alaşımının infiltre edilmesiyle üretilen kompozit levhalara 120 J ve 140 J darbe enerjileri uygulaması sonrası ön ve arka yüz makro görüntüleri gösterilmektedir. 120 J darbe enerjisinde A383 alüminyum alaşımı levhanın ön yüzünde darbe ucunun çarpma sonunda bıraktığı batma izinin derinliğinin artmış olduğu ve ucun çarptığı yerde çatlakların oluştuğu görülmektedir (Şekil 8.13a). Darbe enerjisi düzeyi 140 J darbe enerjisine artırıldığında A383 alüminyum alaşımı levhanda darbe ucunun çarptığı noktada çok az bir sünek biçim değiştirme ile delinme gerçekleşmektedir (Şekil 8.13b).



Şekil 8.13: A383 alüminyum alaşımı levhalara uygulanan a) 120 J ve b) 140 J darbe enerjileri sonrası ön ve arka yüz makro görüntüleri.

40 ppi gözenek yoğunluğunda 90 dakika süreyle seramik kaplandıktan sonra gözeneklerine A383 alüminyum alaşımının infiltre edilmesiyle üretilen kompozit levhanın 120 J darbe enerjisiyle ön yüzde darbe ucunun çarptığı noktanın çevresinde kalınlık boyunca konik yapıya benzer şekilde ana fazda sünek biçim değiştirme ve PEO kaplama ile A383 alaşımı ara yüzeyi boyunca çatlak ilerlemesi gevrek ayrılma veya kopma kırılmasına neden olmaktadır (Şekil 8.14a). 140 J darbe enerjisiyle darbe ucunun kompozit levhaya nüfuz etme durumunun yüksek olduğu ve arka yüzde çatlak boyutunun artmasına karşın çatlak ilerlemesinin darbe test cihazında numunelerin ortasında boşluk bulunan iki adet rijit plaka arasına yerleştirildiği plakaların ortasındaki boşluk çapı (40 mm) ile sınırlandığı görülmektedir (Şekil 8.14b).

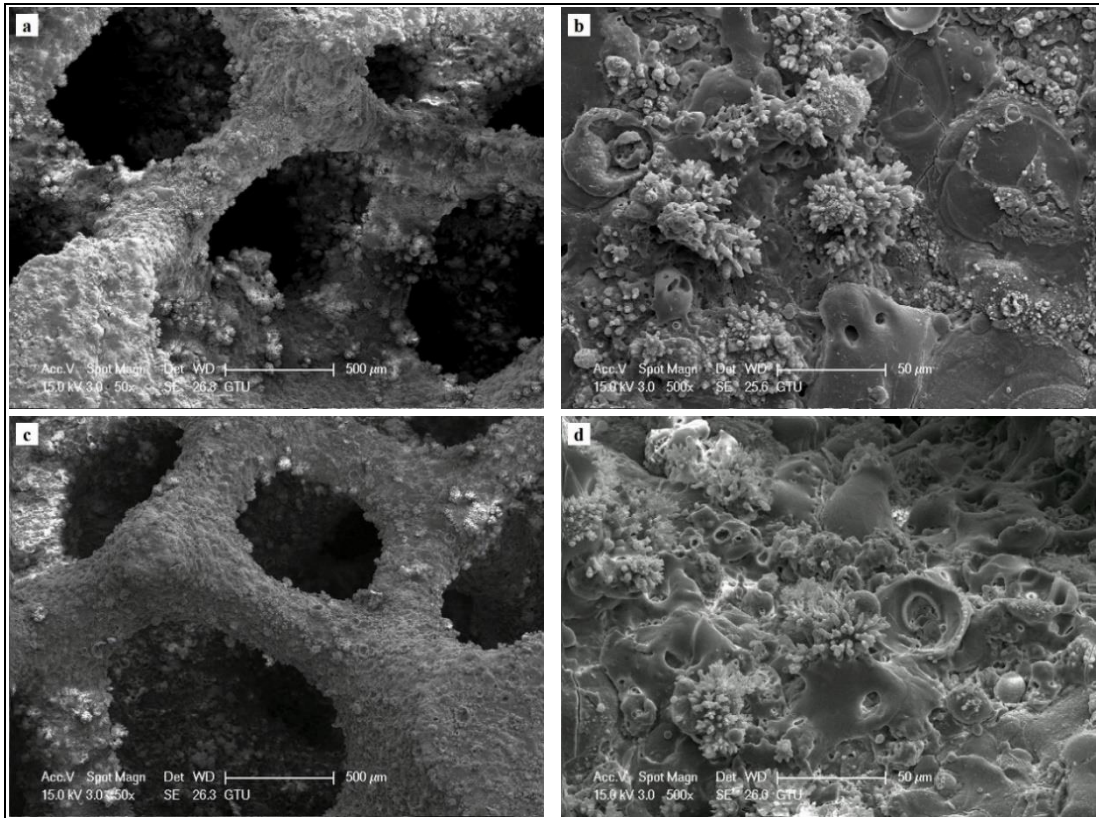


Şekil 8.14: 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan 90 dakika kaplama süresinde üretilen kompozit levhaların a) 120 J ve b) 140 J darbe enerjileri sonrası ön ve arka yüz makro görüntüleri.

## 8.2. Mikroyapı İnceleme Sonuçları

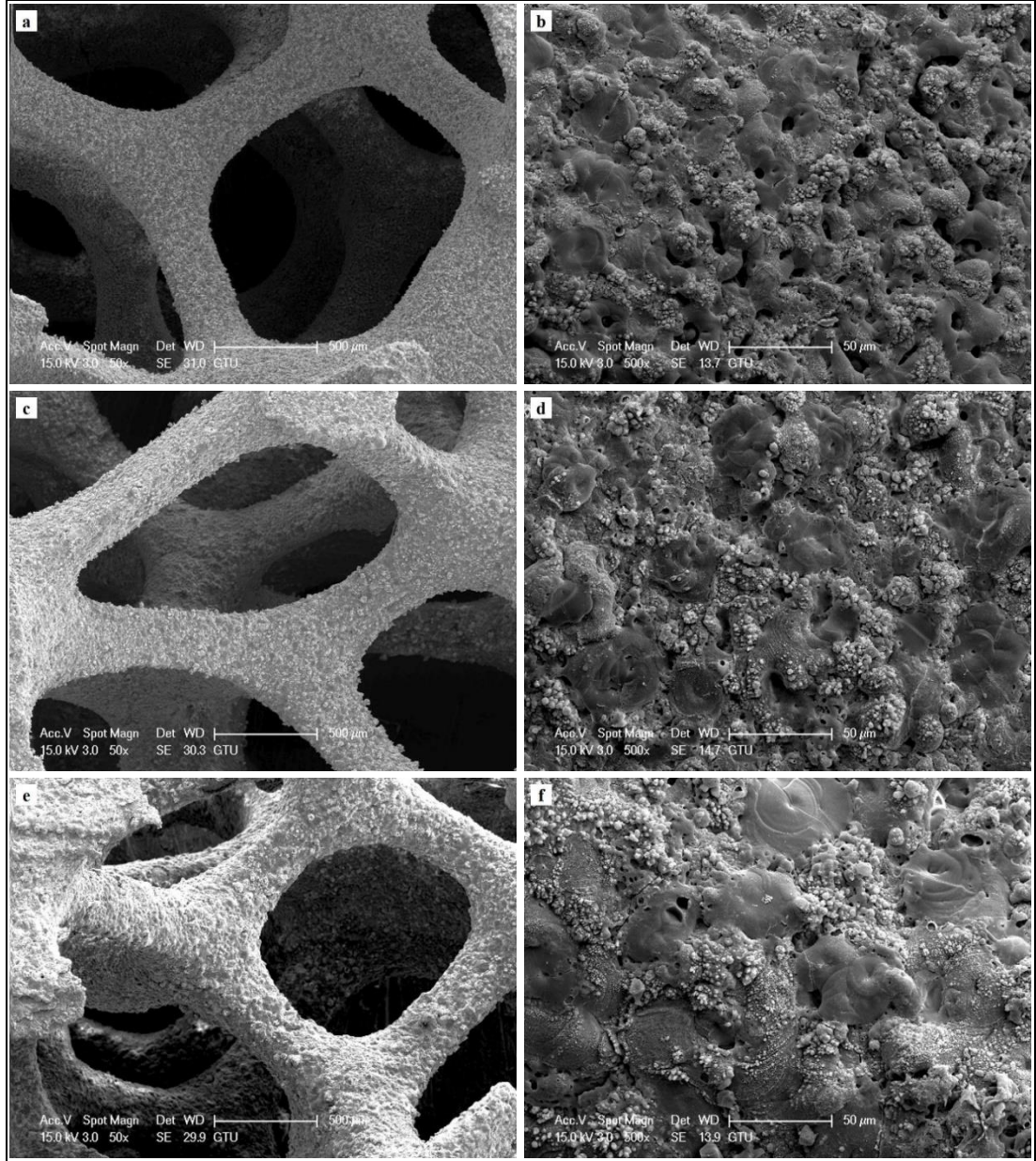
### 8.2.1. PEO Yöntemi ile Üretilen Kaplamaların Yüzey İncelemesi

PEO yöntemiyle 6101 ve 6061 alüminyum alaşımlarının kiriş yüzeyinde üretilen seramik kaplamaların yüzey yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Şekil 8.15'te 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin kiriş yüzeylerinde 90 dakika sürede üretilen kaplamalara ait 50x ve 500x büyütmelerdeki SEM fotoğrafları gösterilmektedir. Şekil 8.16 ve Şekil 8.17'de ise 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin kiriş yüzeylerinde 30 dakika, 60 dakika ile 90 dakika sürelerde üretilen kaplamalara ait 50x ve 500x büyütmelerdeki SEM görüntüleri gösterilmektedir.

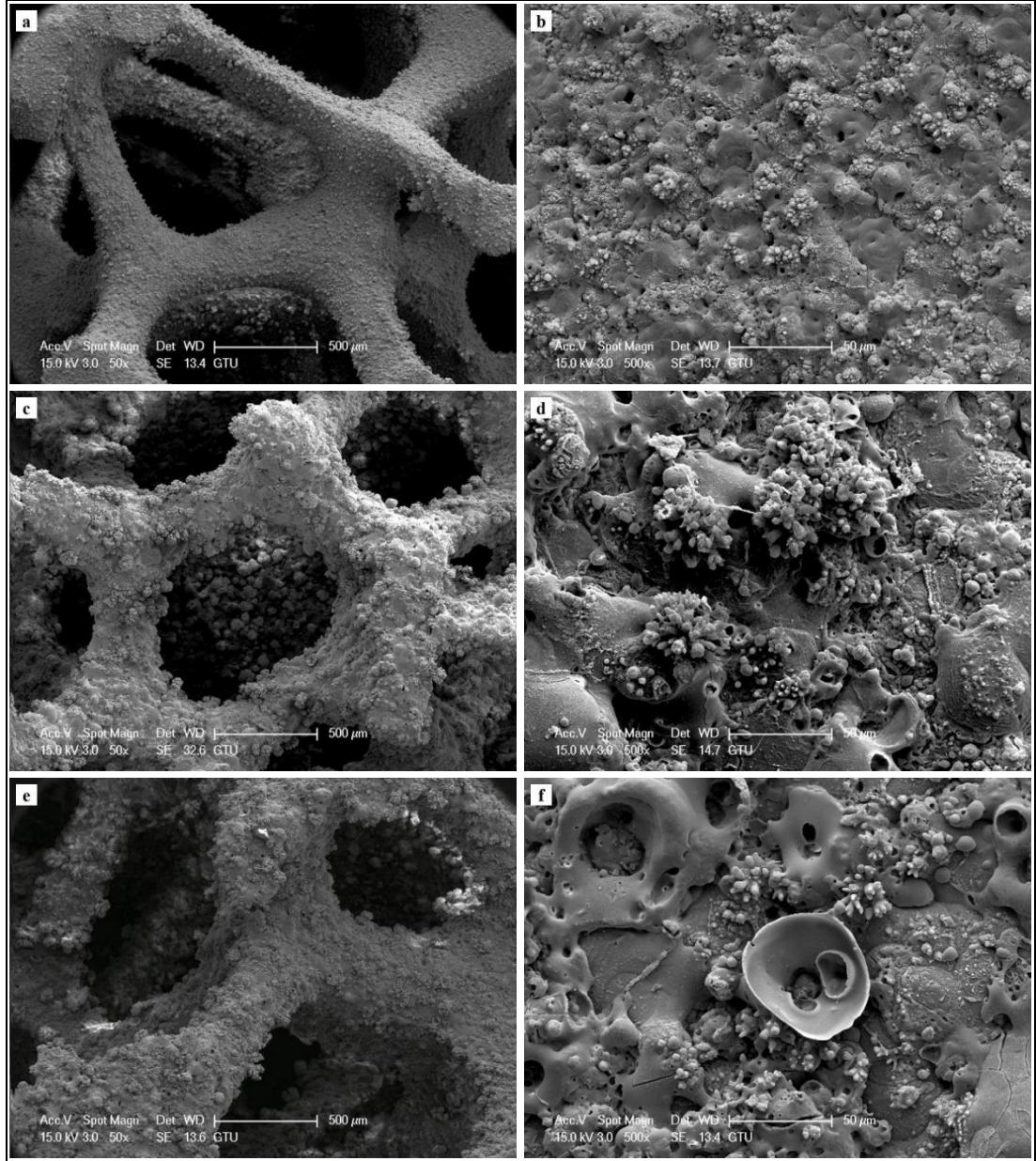


Şekil 8.15: 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde 90 dakika sürede üretilen kaplamaların 20 ppi için a) kiriş ağ yapısı, b) kiriş yüzeyi ve 40 ppi için c) kiriş ağ yapısı, d) kiriş yüzeyi SEM görüntüleri.

PEO işleminden sonra 6101 ve 6061 alüminyum alaşımları köpük malzemelerin giriş yüzeyinde kaplama boyunca mikro gözenek biçiminde dağılmış deşarj kanalları, yumru biçiminde yapılar ve mikro çatlaklar özgün yapısal öğeleri oluşmaktadır. Bu yapısal öğeler tüm kaplama koşulları için elde edilmiştir. Yapısal öğeler arasındaki fark, uygulanan akım yoğunluğu ve kaplama süresine göre değişim göstermektedir (Şekil 8.16 ve Şekil 8.17). Kaplama süresi arttıkça deşarj kanalları çevresinde krater benzeri yapılar gelişirken kanalların genişliği de artmaktadır. Krater benzeri yapılar, kristalli  $\alpha$  ve  $\gamma$  alüminyum oksitleri içermektedir; kaplama süresi arttıkça yumru benzeri yapılar ise mullit fazı oluşumunu göstermektedir. Deşarj kanalları, kanallardan dışarı atılan ve çözelti ile temas ettikten sonra hızla katılaştan erimiş alüminyum oksitler ile çevrilidir. Giriş yüzey yapısının mikro gözenekli özelliği, PEO mekanizmasında önemli işlevlere katkıda bulunan deşarj kanallarının bir sonucu olarak oluşmaktadır. Deşarj kanalları, kaplamaların tüm yüzeyine dağılmış ve koyu dairesel noktalar olarak görülmektedir. Artan kaplama süresiyle deşarj kanal sayısı azalmakta ancak kanal çapı artmaktadır (Şekil 8.16b, Şekil 8.16d ve Şekil 8.16f ile Şekil 8.17b, Şekil 8.17d ve Şekil 8.17f). Düşük kaplama süresinde (30 dakika) oluşan kaplamalarda yüzeyde mikro gözenek varlığı fazladır ve deşarj kanallarının çapı küçüktür. Kaplama süresi 60 dakikaya artırıldığında 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin giriş yüzeylerinde mikro gözenek sayısı ve çapı neredeyse değişmemektedir. 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin giriş yüzeylerinde ise mikro gözeneklerin sayısı azalmakta ancak çapları artmaktadır. 90 dakika kaplama süresinde oluşan mikro gözenek boyutu ve deşarj alanı, 30 dakika ve 60 dakika kaplama sürelerinde oluşanlara göre daha büyük hale gelmektedir ve yüzey yapısı kabalaşmaktadır. Deşarj kanalları çevresinde krater yapılar belirginleşmektedir. Özellikle 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin giriş yüzeylerinde 90 dakika sürede oluşan kaplamalarda deşarj kanalları içerisindeki erimiş oksitler veya çözünmüş gazın yüksek basınçta dışarı saçılması yüzeyde pürüzlülüğün artmasına neden olmaktadır. Kaplamaların yapısal öğelerinin boyutu, kaplama süresine bağlı olarak oksit kaplama kalınlığı ile artmakta ve yüzey boyunca oluşma sıklığı ise azalmaktadır. Dolayısıyla kaplama pürüzlülüğü de kalınlıkla birlikte artmaktadır [Curran and Clyne, 2005, Kalkanci and Kurnaz, 2008, Sundararajan and Krishna, 2003].



Şekil 8.16: 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde, farklı sürelerde PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların yüzey yapıları: a-b) 30 dakika, c-d) 60 dakika, e-f) 90 dakika.



Şekil 8.17: 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde, farklı sürelerde PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların yüzey yapıları: a-b) 30 dakika, c-d) 60 dakika, e-f) 90 dakika.

PEO işleminden sonra alüminyum köpüklerin gözenek boyutları küçülürken kırıç kalınlıkları artmıştır. Tablo 8.1’de 6061 alaşımı alüminyum köpük malzemelerin kaplamasız ve kaplandıktan sonra gözenek yoğunluğuna ve kaplama süresine bağlı olarak gözenek boyutunun ve kırıç kalınlığının SEM fotoğraflarından ölçülen değerleri verilmektedir.

Tablo 8.1. 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemelerin kaplama öncesi ve kaplandıktan sonra ölçülen gözenek boyutu ve kırıç kalınlığı değerleri.

| Gözenek Yoğunluğu (ppi) | PEO Kaplama Süresi (dakika) | Gözenek Boyutu (mm) | Kırıç Kalınlığı (mm) |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|
| 20                      | Kaplamasız                  | $1,29 \pm 0,38$     | $0,32 \pm 0,10$      |
|                         | 30                          | $0,98 \pm 0,15$     | $0,29 \pm 0,02$      |
|                         | 60                          | $0,97 \pm 0,25$     | $0,31 \pm 0,03$      |
|                         | 90                          | $0,90 \pm 0,10$     | $0,32 \pm 0,03$      |
| 40                      | Kaplamasız                  | $0,99 \pm 0,27$     | $0,24 \pm 0,03$      |
|                         | 30                          | $0,90 \pm 0,20$     | $0,26 \pm 0,04$      |
|                         | 60                          | $0,84 \pm 0,25$     | $0,30 \pm 0,05$      |
|                         | 90                          | $0,82 \pm 0,22$     | $0,40 \pm 0,08$      |

### 8.2.2. PEO Yöntemi ile Üretilen Kaplamaların Ara kesit İncelemesi

PEO yöntemiyle 6101 ve 6061 alüminyum alaşımlarının kırıç yüzeylerinde oluşturulan seramik kaplamaların ara kesiti üzerinden kaplama kalınlığı ve yapısı SEM kullanılarak incelenmiştir. 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki köpüklerden şekil 8.18’de 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin, şekil 8.19’da 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin 30, 60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde kırıç yüzeylerinde oluşturulan yapılara ait ara kesit SEM fotoğrafları görölmektedir. SEM fotoğraflarına göre ara kesitlerde “1” no’lu bölge epoksi reçine bölgesini, “2” no’lu bölge plazma elektrolitik oksidasyon ile oluşturulan seramik kaplama bölgesini ve “3” no’lu bölge altlık alüminyum köpük kırıç bölgesini göstermektedir.

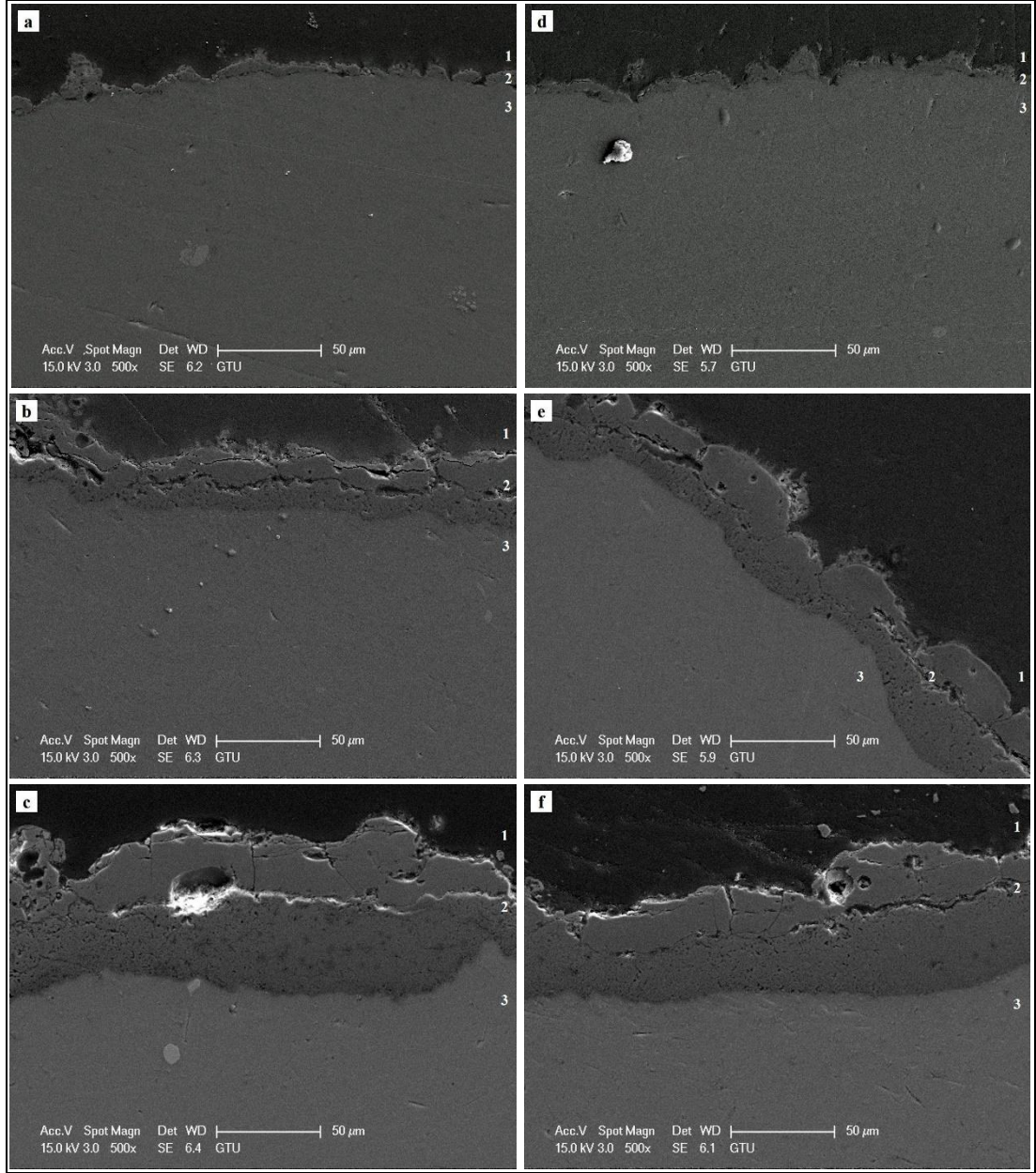
60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde, PEO ile seramik kaplama bölgesi çok sayıda küçük mikro gözenekli bir iç katman ile görece yoğun (sıkı) ve sayıca az kaba gözenekli bir dış katman şeklinde mikro yapı (şekil 8.18b-c ve şekil 8.18e-f ile şekil 8.19b-f) sergilemektedir. 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların 6101 alüminyum alaşımı köpük malzemelerin yüzeyinde oluşan

kaplamalara göre daha fazla sayıda mikro gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.

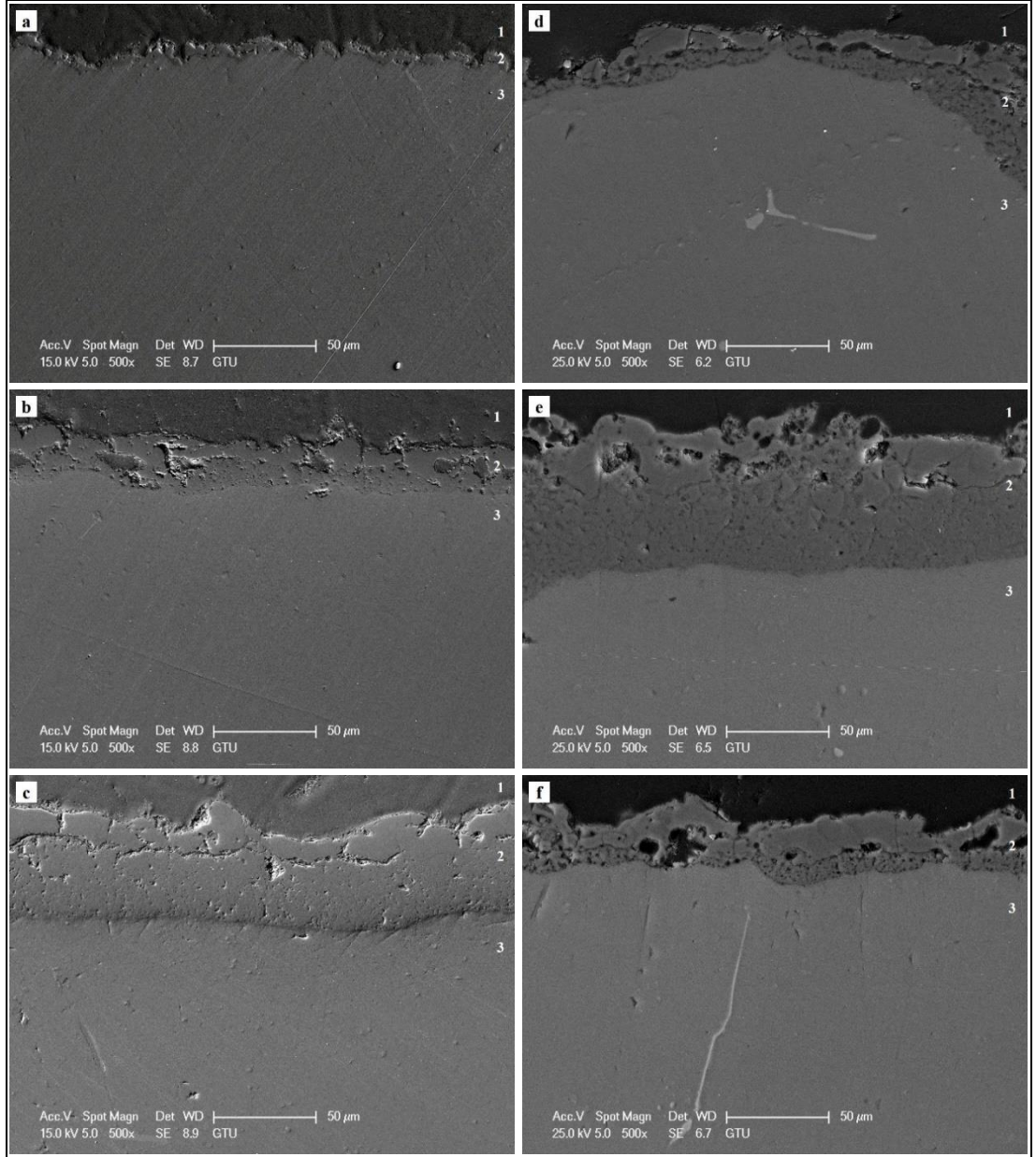
Seramik kaplama bölgesinde 20 ppi gözenek yoğunluğundaki alüminyum köpük malzemeler için kaplama kalınlığı kaplama süresine bağlı olarak artmaktadır (Şekil 8.18a-c ve Şekil 8.19a-c). Kaplama kalınlığı 40 ppi gözenek yoğunluğundaki alüminyum köpük malzemeler için 90 dakika kaplama süresinde azalma eğilimi göstermektedir. Kaplama kalınlığındaki azalma 6061 alüminyum alaşımında belirgin bir şekilde fark edilmektedir (Şekil 8.19f).

Kaplama yüzeyinde belirgin geniş gözeneklerin oluşumu PEO işlemi sırasında oksijen oluşumundan kaynaklanmaktadır. Yüksek basınç ve sıcaklıkların, erimiş oksitlerde önemli miktarda çözünmüş oksijen derişimine neden olduğu düşünülmektedir. Deşarjların süresinin yaklaşık olarak 10  $\mu$ s ile sınırlı olduğu için, oksijen erimiş alümina içerisinde hapsedilmiş olarak kalmaktadır. Eriyik oksitlerin çözelti ile teması sonucunda hızlı bir şekilde soğuması ile çok küçük birbirine bağlı gözenekler oluşmaktadır [Curran and Clyne, 2006].

Küçük, birbirine bağlı gözeneklerin varlığı, PEO kaplamaların yüksek yalıtkan direnç gelişmeden ve tahrip edici enerjik deşarjlar olmadan kararlı bir şekilde önemli kalınlıklarda istikrarlı büyümesini açıklamaya yardımcı olmaktadır. Elektrolit, küçük gözenekler vasıtasıyla kaplamanın kalınlığına nüfuz edebilmekte ve altlık-kaplama ara yüzünün yakınında nispeten ince bir bariyer boyunca deşarjlar meydana gelebilmektedir. Alternatif olarak, gözenekler gazla dolu olacağından daha düşük bir direnç yolu sağlamaktadır. Deşarj kanallarının yüzeyde başlayarak kaplama ara kesiti boyunca kirişe doğru ilerlediği görülmektedir. Kaplamanın dış katmanında alüminyum alaşımı oksitlendiğinde dış katmanda silisyum birikimi iç katman difüzyonu olmaması nedeniyle mullit oluşturmaktadır.



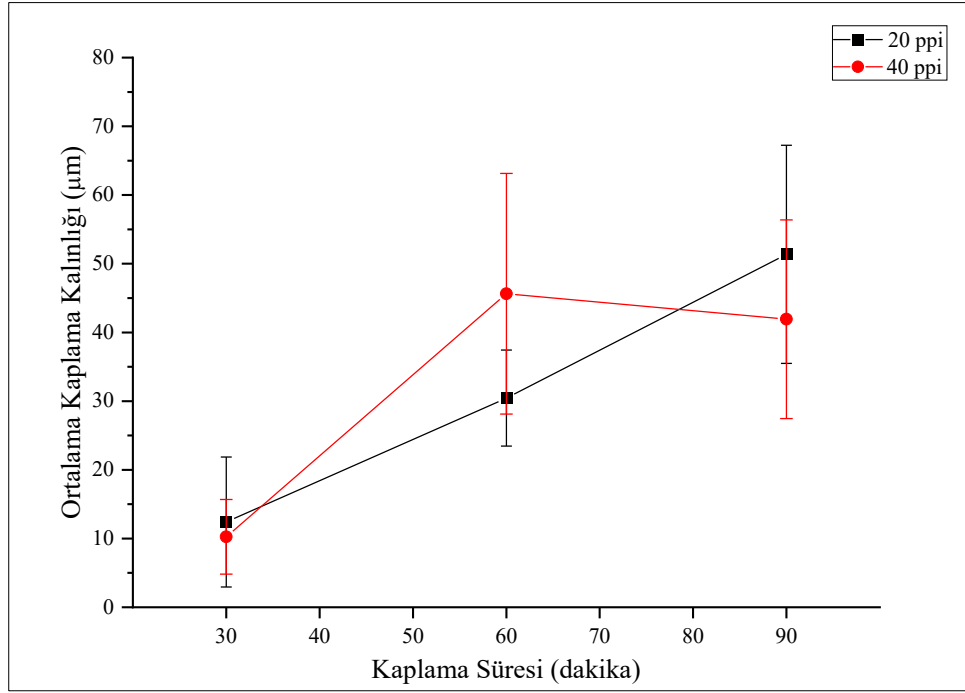
Şekil 8.18: 6101 alüminyum alaşımlı köpüklerin yüzeyinde, 20 ppi gözenek yoğunluğu için; a) 30 dakika, d) 60 dakika ve c) 90 dakika ile 40 ppi gözenek yoğunluğu için; b) 30 dakika, d) 60 dakika, f) 90 dakika sürelerde üretilen kaplamaların ara kesit SEM görüntüleri.



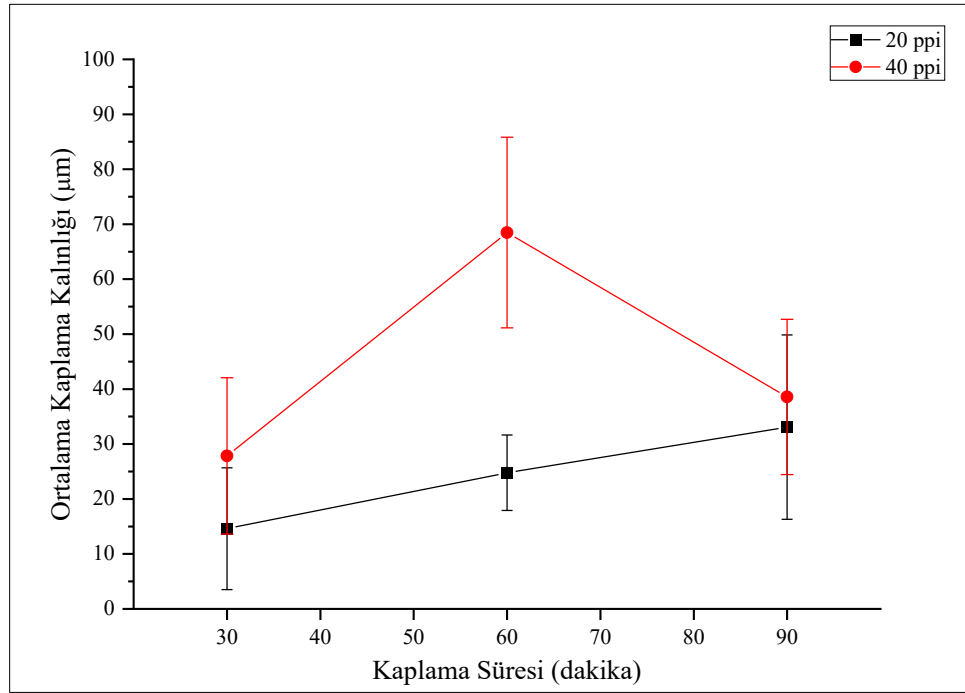
Şekil 8.19: 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde, 20 ppi gözenek yoğunluğu için; a) 30 dakika, d) 60 dakika ve c) 90 dakika ile 40 ppi gözenek yoğunluğu için; b) 30 dakika, d) 60 dakika, f) 90 dakika sürelerde üretilen kaplamaların ara kesit SEM görüntüleri.

### 8.2.3. PEO Yöntemi ile Üretilen Kaplamaların Kalınlığı

PEO yöntemiyle 6101-T6 ve 6061-T6 alüminyum alaşımı köpük yüzeylerinde oluşturulan kaplamaların kalınlıklarının kaplama süresi ile değişimi Şekil 8.20 ve Şekil 8.21’de gösterilmektedir. 6101 alaşımı köpük yüzeyinde 30, 60 ve 90 dakika işlem sürelerinde üretilen kaplamaların ortalama kalınlıkları 20 ppi gözenek yoğunluğu için 8,36, 30,44 ve 44,6  $\mu\text{m}$ ; 40 ppi gözenek yoğunluğu için 10,26, 45,62 ve 41,92  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. 6061 alaşımı köpük yüzeyinde 30, 60 ve 90 dakika işlem sürelerinde üretilen kaplamaların ortalama kalınlıkları ise 20 ppi gözenek yoğunluğu için 14,59, 24,77 ve 33,08  $\mu\text{m}$ ; 40 ppi gözenek yoğunluğu için ise 27,84, 68,48 ve 38,57  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Kaplama kalınlığı, 20 ppi gözenek yoğunluğundaki köpükler için kaplama süresi ile artmaktadır. Kaplama kalınlığı, 40 ppi gözenek yoğunluğundaki köpüklerde 30 ve 60 dakika kaplama sürelerinde artmakta; 90 dakika kaplama süresinde ise azalmaktadır. 40 ppi gözenek yoğunluğundaki köpüklerden 90 dakika sürede kaplanan köpüklerde gerçekleşen kaplama kalınlığındaki azalma birkaç nedenden kaynaklanabilmektedir. Birincisi, uzun kaplama süresi, mikro arkdeşarjlarının kaplama içinden geçmesini zorlaştıran kalın bir kaplamaya yol açmaktadır. Bu nedenle, mikro arkdeşarjlarının sayısı azalır; ancak bunlar daha güçlüdeşarjlara dönüşür ve birkaç büyük ark yüzey üzerinde hareket ederek daha fazla enerji bırakır. Bu da yüzeydeki oksit tabakasının kabararak kırılmasına ve kaplama kalınlığının azalmasına neden olmaktadır [Dunleavy et al., 2011]. PEO işlemi sırasında gözenek içermeyen kütsel malzemelerde de oksit tabakasının büyüme işlemi belirli bir kalınlıktan sonra kaplama hasarı nedeniyle yavaşlar. Diğer bir sebep ise düzensiz akım yoğunluğu dağılımına neden olan, köpüğün iç bölgelerindeki akım yoğunluğunun dış bölgelere göre daha düşük olmasıdır [Liu et al., 2011]. Köpük malzemelerin oksidasyon tabakasının kalınlığı, kırıların genişliğine bağılı olarak sınırlı olmaktadır. Köpüğün gözenek yoğunluğu arttıkça, gözenek boyutu ve kırı genişliği azalmaktadır [Korkmaz, 2015].



Şekil 8.20: PEO yöntemiyle 6101-T6 alaşımı köpük yüzeyinde üretilen kaplamaların ortalama kalınlıklarının kaplama süresi ile değişimi.



Şekil 8.21: PEO yöntemiyle 6061 alaşımı köpük yüzeyinde üretilen kaplamaların ortalama kalınlıklarının kaplama süresi ile değişimi.

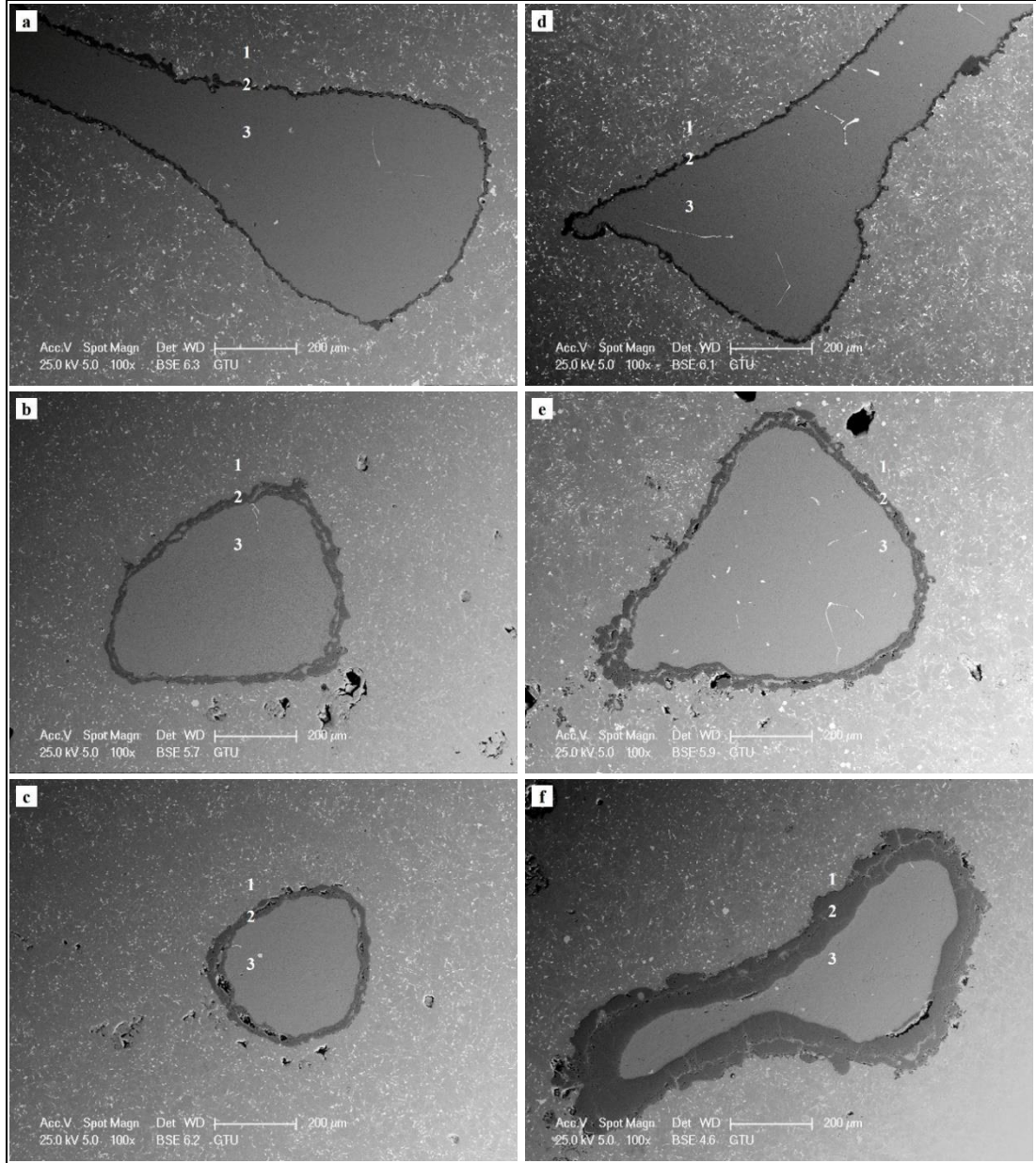
Kaplama oluşumunun gelişmesi ve kaplama kalınlığının artması eriyik alüminyumun deşarj kanallarından dışarı akarken oksitlenmesinden kaynaklanmaktadır. Oksitlenen alüminyum kanallardan çıkarıldığında yüzeyde çözelti ile temas ederek hızla soğumakta ve alümina fazını oluşturmaktadır. Mikro arklar deşarj kanalları boyunca altlık alüminyum yüzeyine ulaştığı sürece kaplama büyüme hızı sabit kalmaktadır ve kaplama oluşumu ara yüzey kontrollü bir süreç olarak devam etmektedir. Kaplama belirli bir kalınlıktan sonra mikro arkların kaplama kırılması ile metal ara yüzeyine ulaşmasının engellenmesi sonucunda büyüme hızı azalmaktadır ve kaplama süresi arttığı sürece kaplamanın kırılması zorlaşmaktadır. Uzun kaplama sürelerinde mikro arklar çok dar alanlarda deşarj olmaya devam etmektedir. Ancak yüksek enerji girişi bu dar alanlarda patlamaya sebep olarak kaplama kalınlığını azaltabilmektedir [Gu et al., 2007, Xue et al., 2000].

Gözenek büyüklüğü 50  $\mu\text{m}$ , 90  $\mu\text{m}$  ve 150  $\mu\text{m}$  olan açık hücreli titanyum köpüklerde PEO işleminin uygulandığı bir çalışmada, kaplama süresindeki değişime ve uygulanan gerilimlere rağmen, tam kaplama oluşumunun sadece 150  $\mu\text{m}$  gözenek boyutuna sahip köpüklerin orta bölgesinde tespit edilmektedir; köpük kalınlığı boyunca kaplama kalınlığı değişimlerinin gözlemlendiği bildirilmektedir [Yan et al., 2010]. Daha küçük gözenek büyüklüğü olan köpükler için ( $\leq 90 \mu\text{m}$  boyutunda) kaplama yalnızca dış yüzeylerde oluşmaktadır. Köpük yapısının karmaşıklığı nedeniyle, köpüğün merkezindeki potansiyel farkı ve çözeltiden taşınabilecek malzeme azalarak kaplama işleminin köpük içerisine doğru gelişmesi engellenebilmektedir. Çözeltinin açık gözenekli köpük malzemelerin içinden geçebilmesi için, köpük geçirgenliğinin artırılması gerekmektedir; köpük yapısından geçecek akışkana daha az direnç olması gerekmektedir [Despois and Mortensen, 2005, Medraj et al., 2007]. Köpük geçirgenliği, gözenek büyüklüğü arttıkça özellikle köpüklerin PEO kaplanmasında yararlı olmaktadır.

#### **8.2.4. İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilen Kompozit Levhaların Ara Kesit İncelemesi**

Şekil 8.22’de A383 alüminyum alaşımının vakum destekli basınçlı döküm ile seramik kaplanan 6061 alüminyum alaşımı köpüklere infiltrasyonu sonucu üretilen kompozit levhaların ara kesit yapısına ait SEM görüntüleri verilmektedir. SEM fotoğraflarına göre ara kesitlerde “1” no’lu bölge A383 alüminyum alaşımını, “2”

no'lu bölge plazma elektrolitik oksidasyon ile oluşturulan seramik kaplama bölgesini ve “3” no'lu bölge altlık alüminyum köpük kiriş bölgesini göstermektedir. Ara kesit görüntülerinde A383 alüminyum alaşımının seramik kaplanan köpük gözeneklerine infiltre edildiği görülmektedir. Mikro yapılarda 1 no'lu bölgelerdeki siyah büyük kısımlardaki yapılar döküm boşluklarından kaynaklanan gözenek yapılarını göstermektedir.



Şekil 8.22: Vakum destekli basınçlı döküm ile üretilen kompozit levhaların ara kesit yapısına ait 20 ppi gözenek yoğunluğu için; a) 30 dakika, d) 60 dakika ve c) 90 dakika ile 40 ppi gözenek yoğunluğu için; b) 30 dakika, d) 60 dakika, f) 90 dakika süreler için SEM görüntüleri.

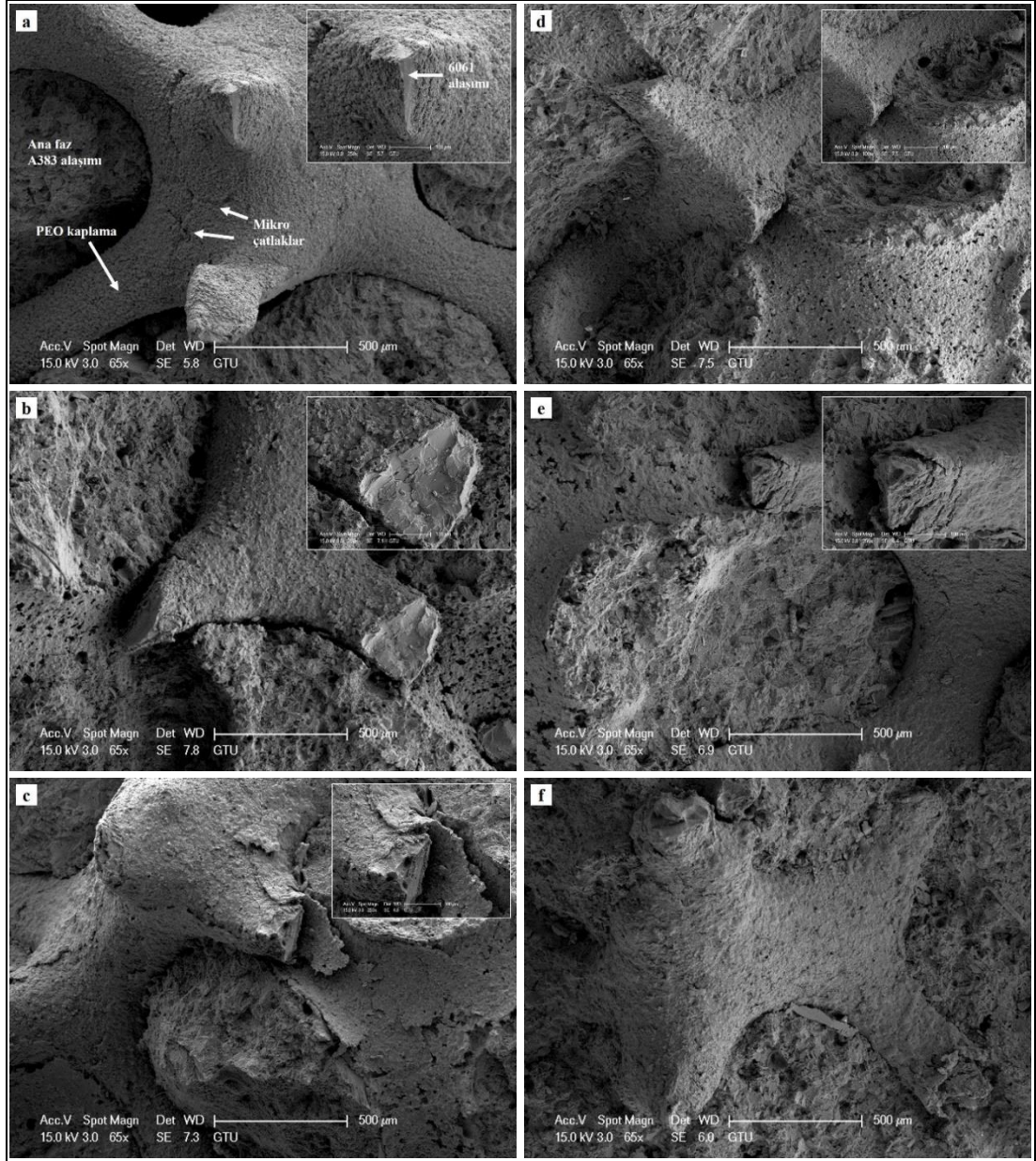
### 8.2.5. Üç Nokta Eğme Testi Sonrası Kırık Yüzey incelemeesi

Eğme kırılma yüzeyleri, özgün mikroyapısal özelliklerin kompozit levhaların kırılma özellikleri üzerindeki etkilerinin anlaşılmasıyla ilgili bilgi sağlamada yardımcı olmaktadır. Şekil 8.23'te 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 30, 60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde seramik kaplandıktan sonra gözeneklerine A383 alüminyum alaşımının infiltre edilmesiyle üretilen kompozit levhaların üç nokta eğme testi sonrası kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri gösterilmektedir.

SEM görüntülerine bakıldığında, ana faz A383 alüminyum alaşımı içerisinde birbirine bağlı olarak bulunan PEO seramik kaplaması ve altlık 6061 alüminyum alaşımını içeren kırıış ağ yapısı görülmektedir (Şekil 8.23a). Eğme testi sonrasında PEO kaplama yüzeyinde mikro çatlaklar oluşmaktadır. Ayrıca, kırıış metal 6061 alüminyum alaşımında sünek biçim değişimi boyunlaşmaya yol açarken; yüzeydeki seramik kaplamanın kırıldığı, ancak biçim değiştirdiği yerlerde bile altlık metal yüzeyine iyi yapışmış bir durumda kalmaktadır.

20 ppi ve 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluklarındaki 6061 alüminyum alaşımı kırıış yüzeyleri başarılı bir şekilde PEO yöntemi ile seramik kaplamaya dönüştürülmüştür. Her iki gözenek yoğunluğunda kaplama süresi ile kaplama kalınlığındaki artış belirgin olarak ayırt edilebilmektedir. 90 dakika kaplama sürelerinde kırıışte kalan altlık metale göre kaplamanın kalınlığı açıkça görülmektedir (Şekil 8.23c ve Şekil 8.23f). Kırıışteki altlık metal hacmi azaldığında, kompozit malzemenin genel karakteri giderek daha kırılğan olmaktadır. PEO kaplamalarda kaplamanın kalınlığı arttıkça kusur yoğunluğu da (mikro çatlaklar, gözenekler) artmaktadır. Kusur yoğunluğundaki bu artış, daha önce bildirildiği üzere daha kalın kaplamaların oluşumu sırasında oluşan yüksek enerjili mikro arkların sonucu olarak malzeme bozulmasındaki artıştan kaynaklanmaktadır [Curran and Clyne, 2005].

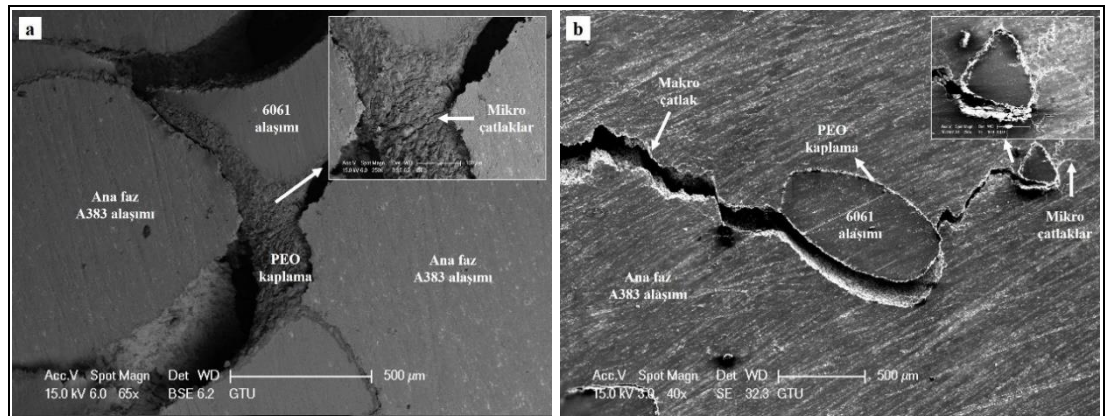
Kompozit levhaların eğme kırılmasında ana faz A383 alüminyum alaşımı kırık yüzeylerinin mikroskobik ölçekte bakıldığında pürüzlü olduğu görülmektedir. Burada sünek A383 alaşımı bölgeler, PEO kaplamalı kırıışleri çevrelemektedir. A383 alaşımı ile PEO kaplama arasında ara yüzey bağı oluşmamakta ve kırılma PEO kaplama yüzeyinde çatlama ve ana fazdan ayrılma şeklinde gerçekleşmektedir. Ana faz A383 alaşımı yırtılma sırtları ve mikroskobik boşluklar içeren gamzeli kopma sünek kırılması göstermektedir.



Şekil 8.23: 20 ppi gözenek yoğunluğu için; a) 30 dakika, d) 60 dakika ve c) 90 dakika ile 40 ppi gözenek yoğunluğu için; b) 30 dakika, d) 60 dakika, f) 90 dakika süreler için kompozit levhaların üç nokta eğme testi sonrası kırık yüzey SEM görüntüleri.

### 8.2.6. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Sonrası Yüzey İncelemesi

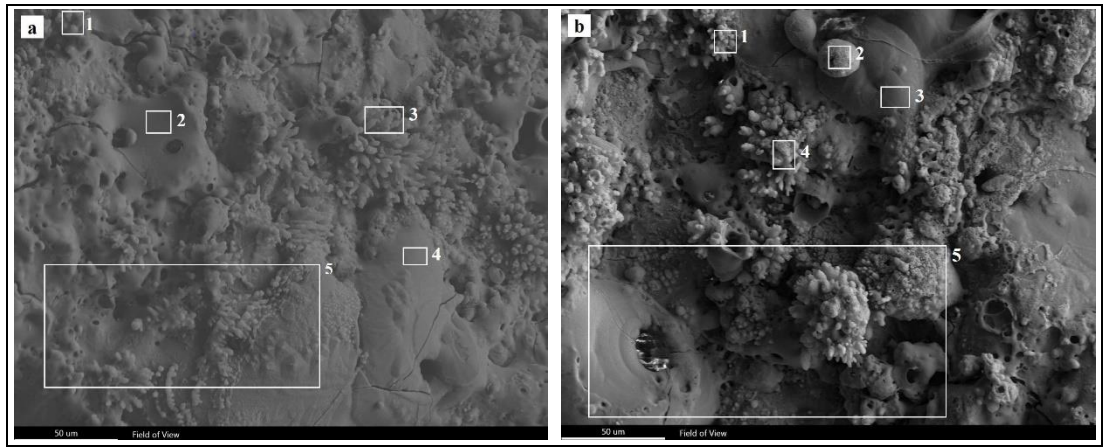
Şekil 8.24'te 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpük yüzeyinin 60 dakika sürede PEO kaplanmasından sonra gözeneklerine A383 alüminyum alaşımının infiltre edilmesi ile üretilen kompozit levhanın 45 J darbe enerjisi uygulama sonrası ön ve arka yüzlerinde oluşan çatlakların SEM görüntüleri gösterilmektedir. Kompozit levhaların hasar mekanizması ana fazdan PEO kaplamaların ayrılmasından kaynaklanmaktadır. Mikro çatlakların PEO kaplama yüzeyinde başladığı ve ana faz metal ile PEO kaplama ara yüzeyinde açık gevrek çatlama ve ayrıca sünek kırılmadan kaynaklanan ana fazdaki çukur şekilli oluşumlar görülmektedir. Gevrek çatlakların PEO kaplama yüzeyi boyunca ilerlediği ve ana faz içerisinde ilerleyen makro çatlığın kaplama ile teması sonrasında enerjisinin azalarak mikro çatlaklar şeklinde dallanmakta ve yön değiştirmektedir (Şekil 8.24b). Buradan, gevrek PEO kaplamanın çatlak ucunda sapmaya ve kompozit levhanın nihai başarısızlığını yavaşlatma etkisine sahip olduğunu göstermektedir. PEO kaplamalarda başlayan mikro çatlaklar, yakındaki PEO kaplama bölgelerindeki diğer mikro çatlaklarla bağlanmak için ana faz boyunca yayılmaktadır. Bu süreç, sonuçta, PEO kaplamalar ve ana faz arasındaki ara yüzeylerde PEO kaplamadan PEO kaplamaya doğru bir yol izleyen malzemede makroskobik bir çatlak üretmektedir. Maksimum kuvvetten sonra numune tamamen başarısız oluncaya kadar sürekli yeni mikro çatlakların başlaması ve mevcut mikro çatlakların birleşmesi, numune kalınlığı boyunca tamamen yayılan makroskobik çatlığı oluşturmaktadır. Bu genel hasar davranışı tüm kompozit levhalarda gözlemlenmektedir.



Şekil 8.24: 45 J darbe enerjisi sonrasında kompozit levhanın a) ön ve b) arka yüzlerinde oluşan çatlakların SEM görüntüleri.

### 8.2.7. Kaplamaların SEM-EDS İncelemesi

PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların yüzeylerinin atomik olarak elementel bileşim analizleri SEM'e uyarlanmış EDS ile gerçekleştirilmiştir. 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 ve 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeylerinde 90 dakika kaplama süresinde üretilen kaplamalara ait yüzey EDS sonuçları sırasıyla, Tablo 8.2, Tablo 8.3, Tablo 8.4 ve Tablo 8.5'te verilmektedir. PEO kaplamaların element bileşimlerini karakterize etmek için kullanılan gerçek tarama alanları, Şekil 8.25 ve Şekil 8.26'daki SEM fotoğraflarında gösterilmektedir.



Şekil 8.25: a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alüminyum alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika sürede PEO yöntemiyle üretilen kaplamanın yüzey SEM fotoğrafı.

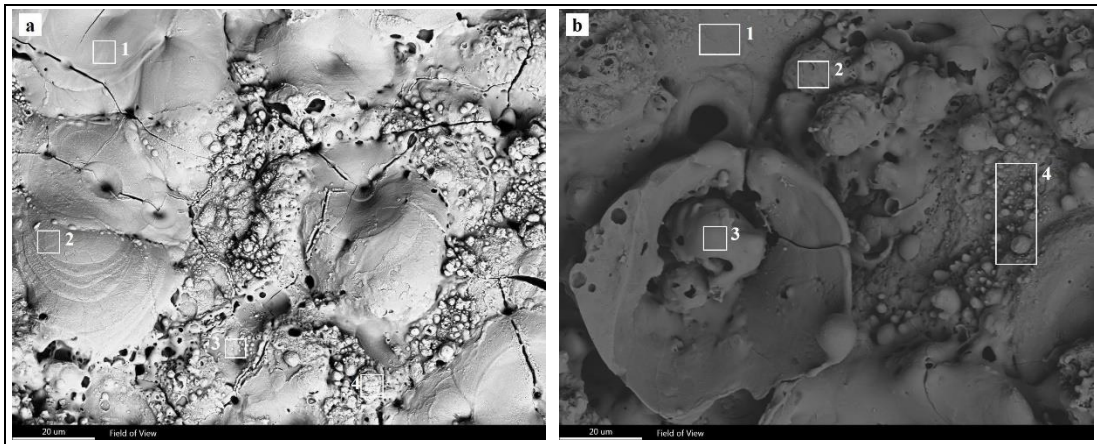
Tablo 8.2: 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika kaplama süresinde üretilen kaplama yüzeyinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça).

| Seçilen Alan | Al    | O     | Si    | P    | K    | Na   | Al:O |
|--------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 1            | 4,58  | 45,64 | 39,93 | 5,55 | 2,57 | 1,73 | 0,1  |
| 2            | 48,06 | 39,17 | 9,45  | 2,28 | 0,58 | 0,47 | 1,23 |
| 3            | 9,07  | 46,9  | 34,09 | 4,45 | 2,91 | 2,58 | 0,19 |
| 4            | 40,88 | 45,11 | 9,69  | 2,16 | 0,72 | 1,45 | 0,91 |
| 5            | 22,91 | 42,1  | 27,87 | 2,98 | 2,43 | 1,72 | 0,54 |

Tablo 8.3: 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika kaplama süresinde üretilen kaplama yüzeyinin kimyasal bileşimi (%ağırlıkça).

| Seçilen Alan | Al    | O     | Si    | P    | K    | Na   | Al:O |
|--------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 1            | 6,83  | 39,94 | 41,83 | 4,98 | 3,88 | 2,54 | 0,17 |
| 2            | 21,56 | 40,52 | 29,6  | 4,52 | 2,57 | 1,24 | 0,53 |
| 3            | 49,82 | 36,18 | 9,51  | 3,28 | 0,62 | 0,59 | 1,38 |
| 4            | 9,33  | 40,66 | 39,41 | 4,99 | 3,47 | 2,14 | 0,23 |
| 5            | 20,49 | 40,76 | 29,76 | 3,76 | 3,31 | 1,92 | 0,50 |

EDS analizleri ile PEO kaplamaların yapısında Al, O, Si, P, K ve Na elementleri tespit edilmiştir. Yüzeydeki bu elementler kaplama süreci boyunca  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$  ve KOH içeren çözeltiden elektrik alan etkisi ile iyon olarak gelmekte ve mikrodeşarj kanallarında elektrostatik kuvvetlerin etkisi ile reaksiyona girerek, kaplama yüzeyinde alümina ve mullit oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Al elementi altlık alüminyum köpükten, mikrodeşarj kanallarından atılan alümina fazları ile yüzeye gelmektedir. Deşarj kanalları çevresinde yapılan EDS analizlerinde Al ve O elementlerinin nicel oranları yüksek olarak ölçülmüştür. Si elementinin nicel oranı yumrulu yapılarda yüksek,deşarj kanalları çevresinde ise düşük olarak ölçülmüştür. Yumrulu yapıların XRD analizinde tespit edilen mullit fazı olarak tespit edilmiştir. Deşarj kanalları çevresindeki krater yapılarında alfa alümina ve gama alümina fazları yoğun olarak bulunmaktadır.



Şekil 8.26: a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika sürede PEO yöntemiyle üretilen kaplamanın yüzey SEM fotoğrafı.

Tablo 8.4: 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika kaplama süresinde üretilen kaplama yüzeyinin kimyasal bileşimi (%ağırlıkça).

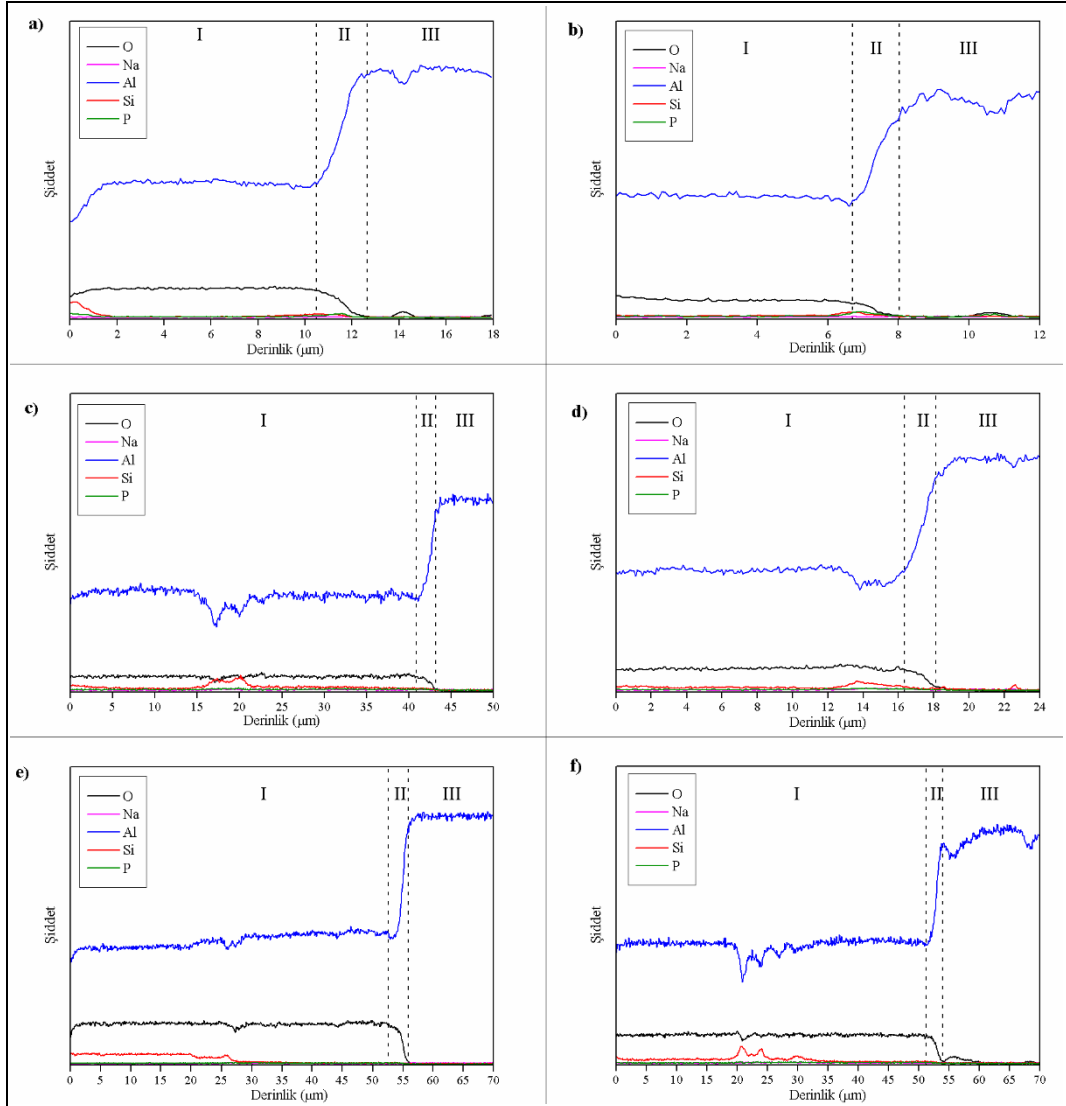
| Seçilen Alan | Al    | O     | Si    | P     | K    | Na   | Al:O |
|--------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1            | 61,34 | 13,66 | 11,27 | 12,86 | 0,83 | 0,05 | 4,5  |
| 2            | 41,27 | 27,9  | 19,34 | 10,44 | 0,78 | 0,26 | 1,48 |
| 3            | 46,25 | 24,01 | 17,04 | 11,44 | 0,96 | 0,31 | 1,93 |
| 4            | 6,29  | 37,21 | 40,41 | 11,28 | 3,15 | 1,67 | 0,17 |

Tablo 8.5: 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alaşımı köpük yüzeyinde 90 dakika kaplama süresinde üretilen kaplama yüzeyinin kimyasal bileşimi (%ağırlıkça).

| Seçilen Alan | Al    | O     | Si    | P    | K    | Na   | Al:O |
|--------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 1            | 5,89  | 35,05 | 45,56 | 8,39 | 3,7  | 1,41 | 0,17 |
| 2            | 21,33 | 27,39 | 29,07 | 8,88 | 8,05 | 5,27 | 0,78 |
| 3            | 48,64 | 27,79 | 13,2  | 8,27 | 1,58 | 0,51 | 1,75 |
| 4            | 24,15 | 29,02 | 32,87 | 8,83 | 4,15 | 0,98 | 0,83 |

PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların kesit alan elementel çizgi analizleri SEM'e uyarlanmış EDS ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.27 ve Şekil 8.28'de 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 ve 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeylerinde 30, 60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde üretilen kaplamaların kesit alan EDS çizgi analizleri gösterilmektedir. 6101 alüminyum alaşımı köpük yüzeylerinde üretilen PEO kaplamaların kesit alanlarında O, Na, Al, Si ve P elementleri; 6061 alüminyum alaşımı köpük yüzeylerinde üretilen PEO kaplamaların kesit alanlarında ise O, Mg, Al, Si ve P elementleri tespit edilmiştir. O, Na, Si ve P elementleri çözelti içerisinde çözünen kimyasallardan gelmektedir. Bu yüzden Na ve P elementlerinin miktarı kaplamanın dış kısmında yüksek olmakla birlikte altlık malzemeye doğru azalmaktadır. Na ve P elementlerinin derişimi oldukça düşüktür. Altlık malzemenin alaşımına bağlı olarak kaplama içerisinde dâhil olan elementler de değişmektedir. Mg elementi 6061 alüminyum alaşımı köpük yüzeylerinde üretilen kaplamaların kesit alanlarında ve altlık alüminyum köpükten gelmektedir. Si elementi ise çözelti içerisinde çözünen sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) kimyasalından ve altlık alüminyum köpükten gelmektedir. PEO işlemi sırasında oluşan yüksek bölgesel sıcaklıklar Al ve alaşım elementlerinin (Al, Si, Cu, Mg, Zn, vb.) dışarı doğru yayılımına; Na, Si, O gibi elementlerin de içeri doğru yayılımına neden olmaktadır. Yüzeyde alümina ve alümina silikat bileşikler oluşmaktadır.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$  ve KOH içeren çözeltiden gelen O ve Si elementleri, elektrolit hazırlama esnasında ve PEO işlemi süresince meydana gelen elektrik alan varlığından dolayı, iyonize olmaktadır. Uygulanan akım yoğunluğu

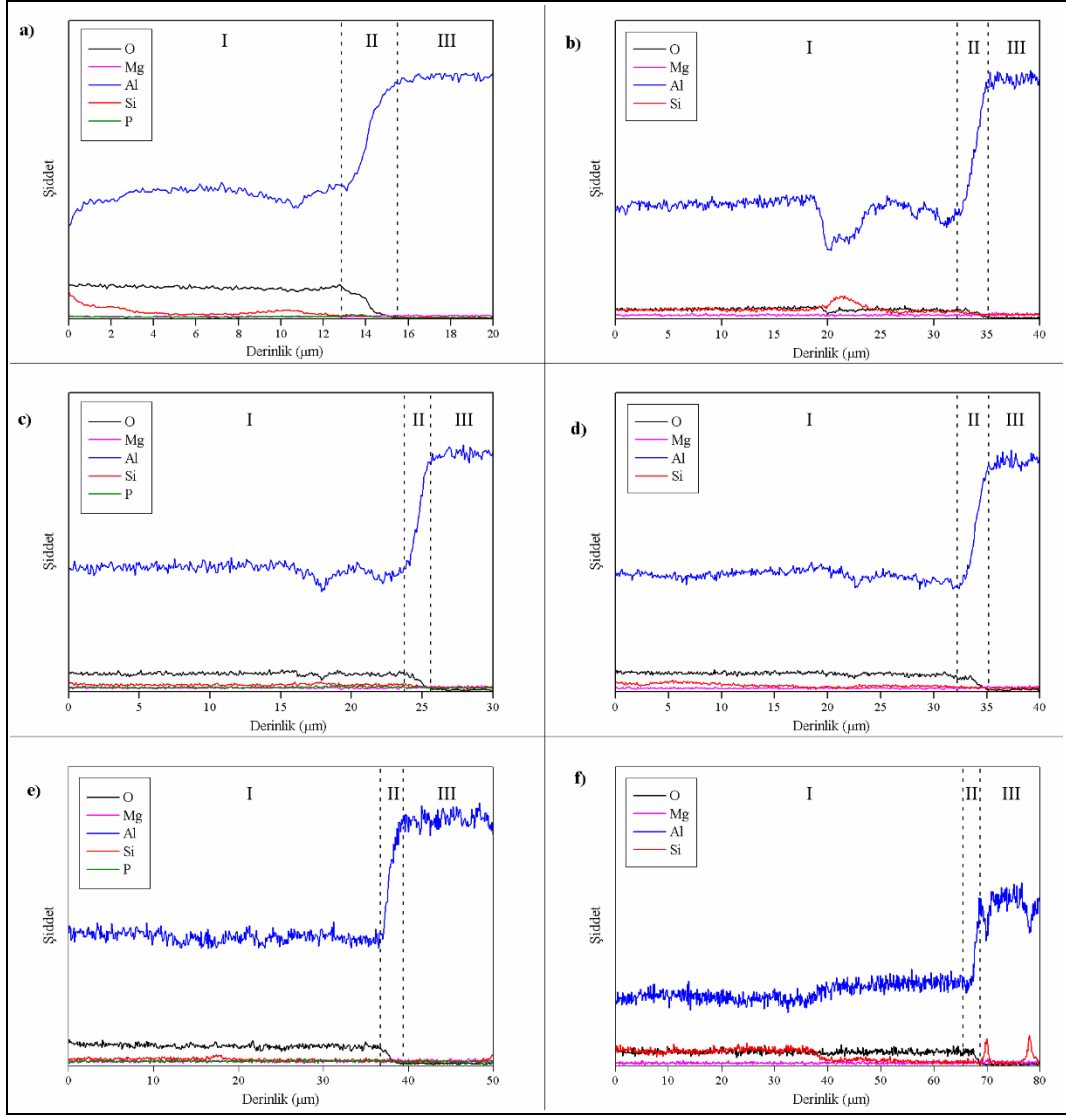
ve kaplama süresi ile alümina ve alümina silikat bazlı yapıların oluşması için gerekli olan iyonize haldeki O ve Si elektrik alan etkisiyle mikro deşarj kanallarından kaplama yapısına girer. Aynı anda, iyonize Al altlık alüminyum köpükten mikro deşarj kanallarına girmektedir.



Şekil 8.27: 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde 20 ppi için a) 30 dakika, b) 60 dakika, c) 90 dakika süreler ile 40 ppi için d) 30 dakika, e) 60 dakika ve f) 90 dakika sürelerde PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların kesit alan EDS çizgi analizleri.

Bu işlemin neticesinde mikro deşarj kanallarındaki elektrik alan ve elektrostatik kuvvetlerin etkisiyle iyonlar birbirleriyle reaksiyona girerek alümina ( $\gamma$  ve  $\alpha$ ) ve mullit fazlarını oluşturmaktadırlar. Şekil 8.27 ve Şekil 8.28’de görüldüğü üzere Al elementinin şiddetinde artışın ve O elementinin şiddetinde azalmanın başladığı kesit

alanı kaplama/altlık alüminyum köpük ara yüzeyini göstermektedir. Ancak kaplama kalınlığına göre daha küçük bir kalınlığa sahiptir (1-5  $\mu\text{m}$ ) ve SEM kesit alan fotoğraflarında fark edilememektedir.



Şekil 8.28: 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde 20 ppi için a) 30 dakika, b) 60 dakika, c) 90 dakika süreler ile 40 ppi için d) 30 dakika, e) 60 dakika ve f) 90 dakika sürelerde PEO yöntemiyle üretilen kaplamaların kesit alan EDS çizgi analizleri.

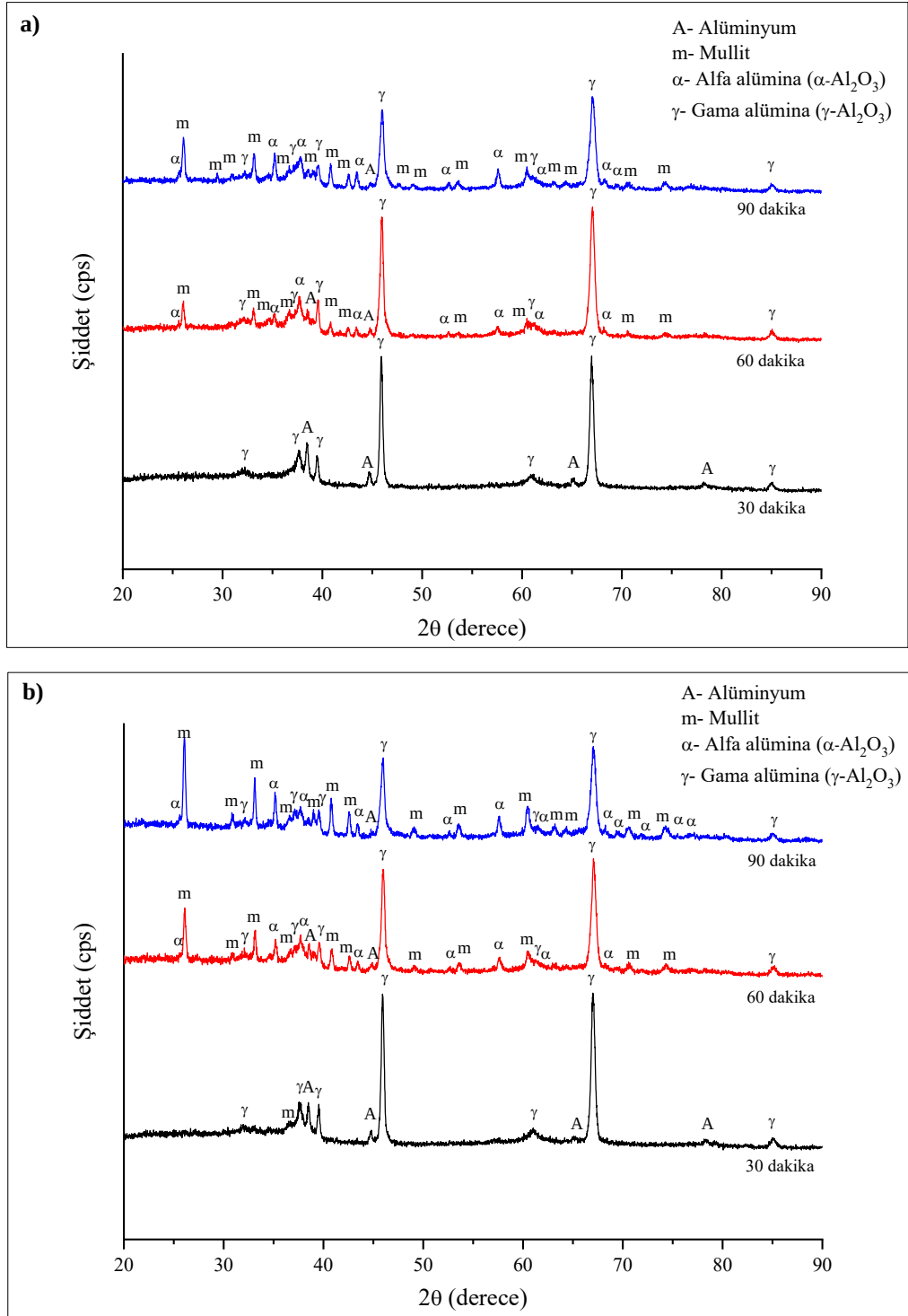
### 8.2.8. Kaplamaların XRD ile Faz Çözümlemesi

Plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yöntemiyle 6101 ve 6061 alüminyum alaşımı köpük yüzeylerinde oluşturulan kaplamaların faz yapısını tespit etmek için, X-ışınları kırınımı (XRD) analizi gerçekleştirilmiştir. Gözenek yoğunlukları 20 ppi ve 40 ppi alüminyum köpüklerden 6101 ve 6061 alaşımı köpük yüzeyinde üç farklı kaplama sürelerinde (30, 60 ve 90 dakika) üretilen kaplamalar için XRD analiz sonuçları sırasıyla, Şekil 8.29 ve Şekil 8.30'da gösterilmektedir.

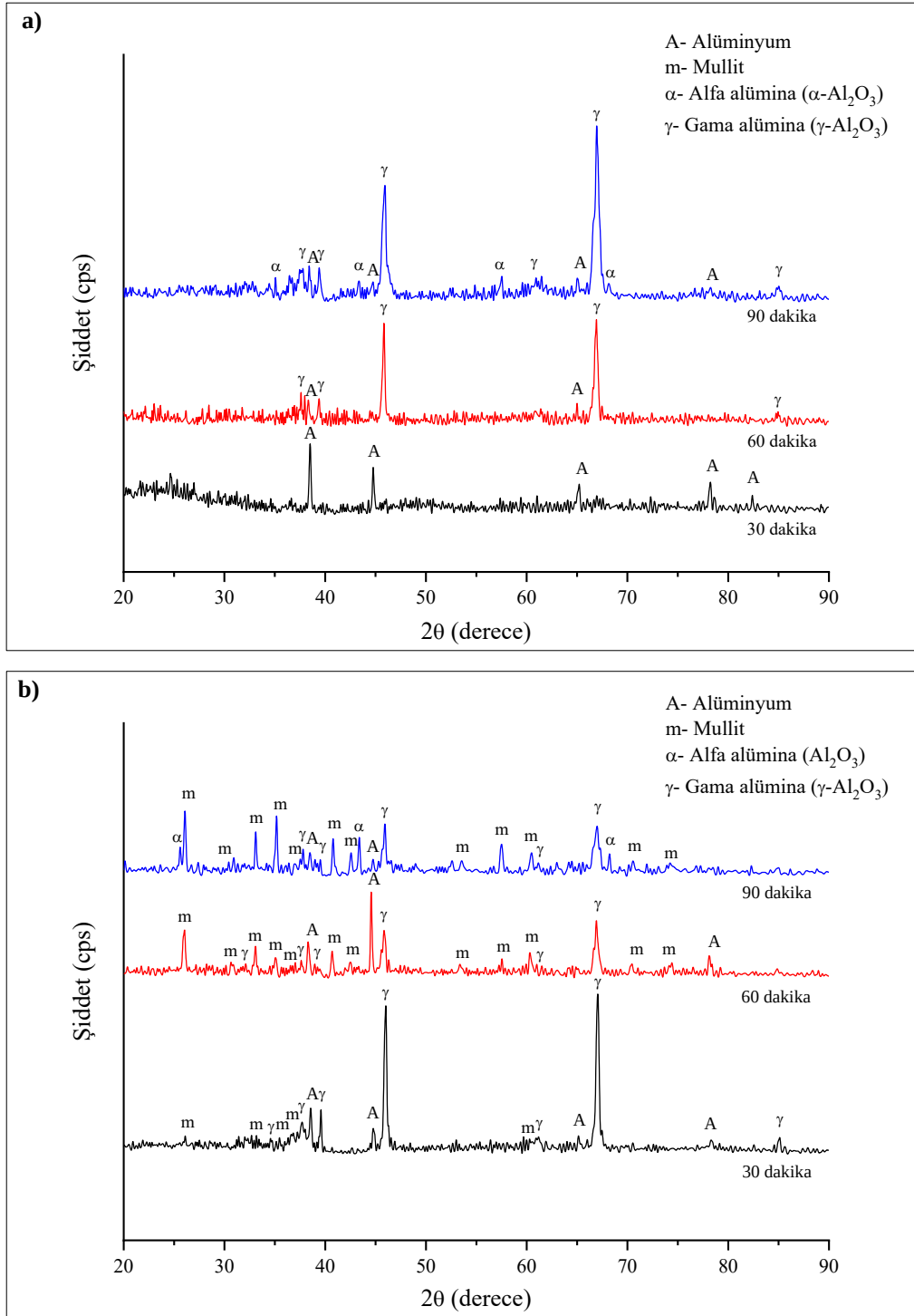
XRD analiz sonuçlarına göre sodyum silikat esaslı çözelti içerisinde üretilen PEO kaplamaların yüzeylerinde gama alümina ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), alfa alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), mullit (Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub>) fazları ve altlık alüminyum köpükten gelen Al fazı tespit edilmiştir.

Düşük kaplama süresinde (30 dakika) üretilen PEO kaplamaların yapısında gama alümina ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oluşmaktadır. Alfa alümina ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) fazı 60 dakika süre ile yapılan kaplamalardan itibaren oluşmaktadır. Kaplamada öncelikle gama alümina oluşmuştur ve plazma deşarjının neden olduğu sıcaklık yükselmesiyle birlikte deşarj kanalı içerisinde yüksek sıcaklık fazı  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşmaya başlamaktadır. Yarı kararlı gama alüminanın yaklaşık olarak 800-1200°C yüksek sıcaklık aralığında  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazına dönüştüğü bilinmektedir [Liu et al., 2011]. Artan kaplama süresi ile mullit ve  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazlarının oluşumu artmaktadır. XRD analizi sonuçlarından yüksek kaplama sürelerinde mullit oluşumu belirgin olarak olduğu tespit edilmiştir. Plazma deşarj yoğunluğu, yüksek kaplama sürelerinde artarak Si iyonlarına yüzeyde daha fazla yer açılmasına ve mullit oluşumunun artmasına neden olmaktadır.

Seyreltik sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) çözeltisinin (4 g/L) kullanılması düşük kaplama süresinde (30 dakika) mullit faz oluşumunu kısmen engellemektedir. Derişik sodyum silikat çözeltisi ile üretilen kaplamalarda mullit fazının yoğunluğu artarken alümina fazlarının ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yoğunluğu azalmaktadır. Çözeltideki silisyum iyonları alüminyum köpük altlığı ile bileşik yaparak kaplama yapısında mullit fazı bileşiminde bulunarak alümina fazlarının oluşumunun azalmasına neden olmaktadır. Mullit fazı, kaplamaların yüzeyindeki gözenekli, gevşek dış katmanda bulunmaktadır ve sodyum silikat derişiminin artırılması ile oluşumu artmaktadır [Polat et al., 2010].



Şekil 8.29: 6101 alüminyum alaşımlı köpük yüzeylerinde üretilen PEO kaplamaların a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunlukları için XRD sonuçları.



Şekil 8.30: 6061 alüminyum alaşımı köpük yüzeylerinde üretilen PEO kaplamaların  
a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunlukları için XRD sonuçları.

Kaplamada mullit ve alümina fazları doğrudan deşarj kanalındaki plazma ısı kimyasal tepkimeler sonucunda oluşmaktadır. Termodinamik olarak kararlı, yüksek sıcaklık fazı  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yalnızca deşarj kanalının içinde oluşmaktadır. Çünkü deşarj kanalı içerisindeki sıcaklık, kaplama-çözelti ara yüzey sıcaklığından daha yüksektir.

$\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazı deşarj kanalı içerisinde, kısmen daha düşük sıcaklıktaki dış katmanda oluşmaktadır. Oldukça fazla aşırı soğumalarda erimiş alüminanın katılaşmasının,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  için kritik serbest çekirdeklenme enerjisinin daha düşük olması nedeniyle  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  yerine  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  oluşumuyla sonuçlandığı belirtilmektedir [McPherson, 1973, Xue et al., 2001].  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazının  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazına dönüşmesi için hem katyon hem de anyon iyonlarının yeniden düzenlenmesi gerekmektedir ve bu dönüşüm sadece yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir.  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  dönüşümünün, oda sıcaklığında kararlı  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazına yol açan bir dizi geçiş fazından ( $\delta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) geçtiği bilinmektedir. Bu ara geçiş fazları  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazına benzer olduğundan, geçiş dizisi uygun bir şekilde  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  tek fazlı dönüşümü olarak gösterilebilmektedir [Dehnavi et al., 2014].

Ancak, mullit fazı sadece dış katmanda oluşmaktadır. Si bileşikleri genellikle çözeltide çözünmezler ve anodik yüzey üzerinde jel biçiminde kalmaktadır ve büyüyen alümina tabakası yüzeyinde kolayca birikebilmektedir. Si bileşiklerinin oluşumu, mikro deşarjların yüksek çıkarılma hızının bir sonucu olarak kaplama yüzeyinde Si bileşiklerinin birikmesi ve ayrılmasından kaynaklandığı ve dolayısıyla mullit fazı oluşumunun gerçekleştiği bildirilmektedir [Sharma et al., 2017].

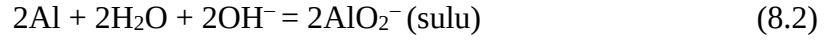
Numune-çözelti ara yüzeyinde  $\text{SiO}_3^{2-}$  anyonları anotlama işlemi sonucunda aşağıdaki tepkimedeki gibi  $\text{SiO}_2$  oluşturmaktadır [Xin et al., 2006]:



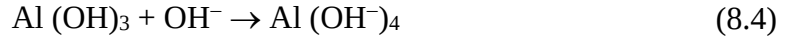
Kaplama yüzeyinde oluşan mullit fazı 1810 °C erime sıcaklığına sahip olan, iyi ısı ve kimyasal kararlılık gösteren önemli bir seramik malzemesidir [Ramaswamy et al., 1998]. Erime sıcaklığı 2050 °C olan  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , alüminanın kararlı bir fazıdır ve  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazının tüm alüminyum oksitler arasında yarı kararlı bir faz olduğu bilinmektedir. Diğer taraftan,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  800 °C ve 1200 °C sıcaklık aralığına ısıtılarak  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazına dönüştürülebilmektedir [Han-Hua et al., 2003].

PEO işleminde  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oluşum mekanizması aşağıdaki tepkimelerde verilmektedir [Sharma et al., 2017]:

1. Taban Al metalinin kimyasal aşınması sonucunda çözeltide alüminat ( $\text{AlO}_2^-$ ) iyonu ve  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  oluşmaktadır:



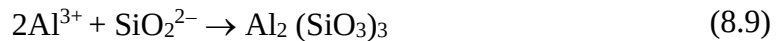
Alüminyum hidroksit  $\text{OH}^-$  ile tekrar çözülerek alüminyumun oksitlenmesi oluşabilmektedir;



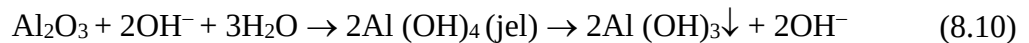
2. Anodik deşarj yüksek bir elektrik potansiyeli, yani, kırılma gerilimi altında meydana gelmektedir. Oksijen çıkışı suyun oksitlenmesi nedeniyle oluşmaktadır. Oksijen iyonlaşır ve oksijen anyonları  $\text{O}^{2-}$  anoda doğru göç ederek alüminyum oksit oluşturmak için alüminyum katyonlarıyla ( $\text{Al}^{3+}$ ) tepkimeye girmektedir:



3. Alüminyum katyonların bazıları çözelti içerisine düşebilir ve hidroksit veya silikatla reaksiyona girebilmektedir:



Alümina kaplamanın kalınlığı kimyasal çözünmenin bir sonucu olarak azalabilmektedir;



4. Metalin anodik çözünmesi katyonların çözeltide serbest kalmasını sağlamaktadır:



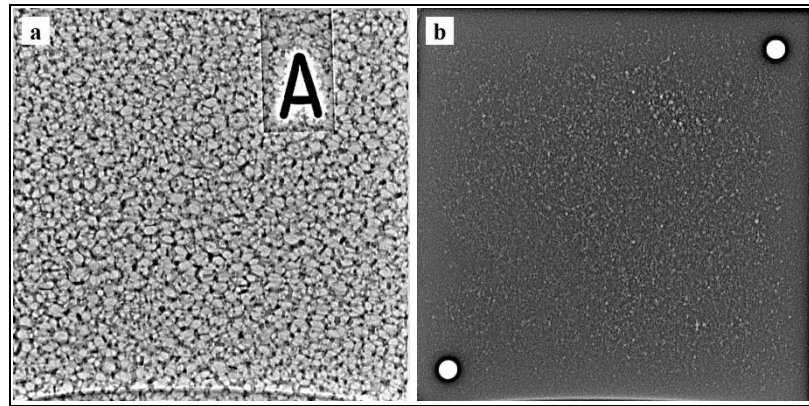
5. Katodik çevrimde metal birikimi ve hidrojen oluşumu meydana gelebilmektedir:



Kararlı alümina fazı  $\theta$ -,  $\rho$ -,  $\delta$ -,  $\eta$ -,  $\gamma$ -alüminanın ısıtılmasıyla birkaç adımdan sonra oluşmaktadır ve son olarak kararlı  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazına dönüşmektedir [Sharma et al., 2017].

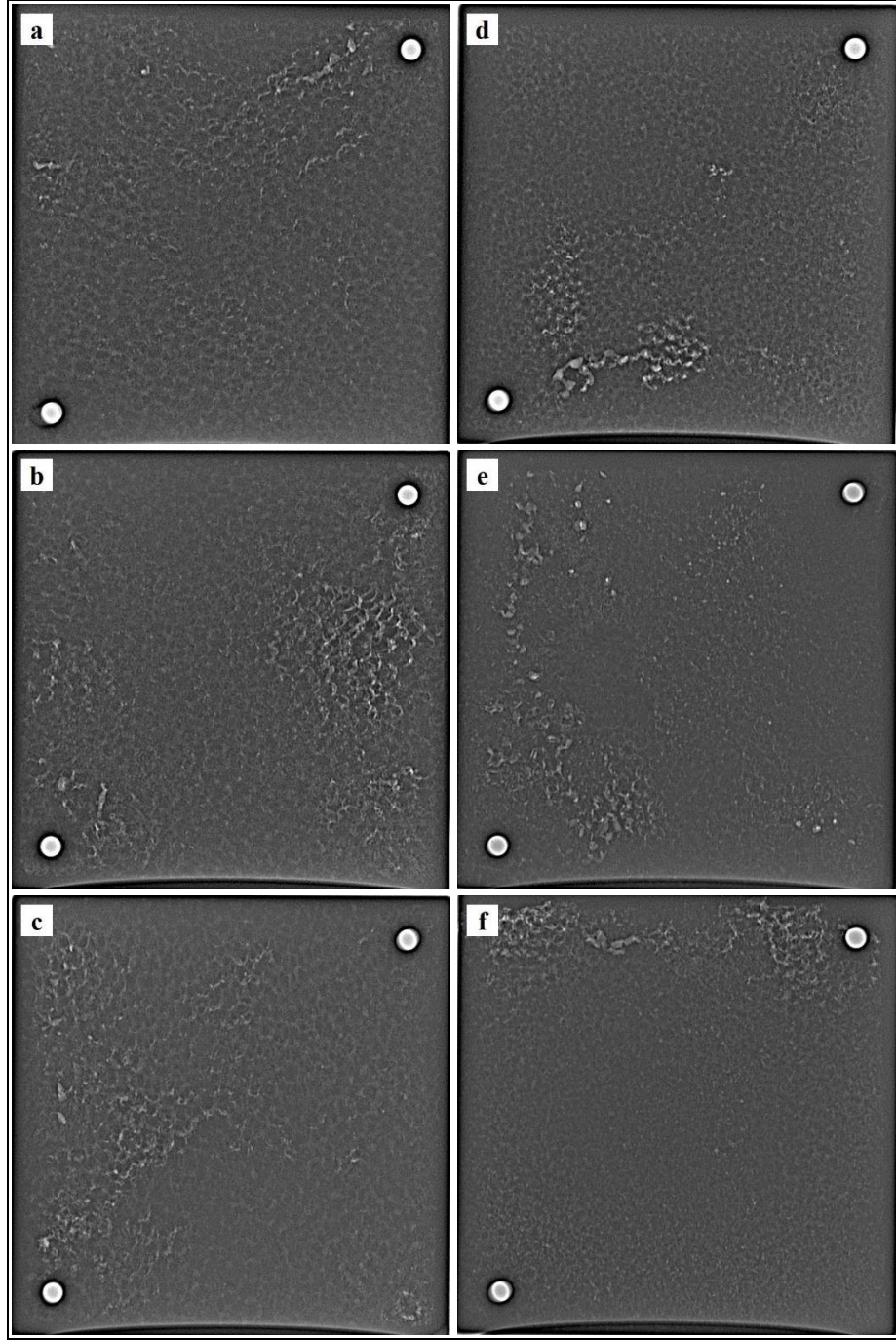
### 8.2.9. X-ışını Mikro Bilgisayarlı Tomografi (mikro-CT) Sonuçları

Şekil 8.31a'da 20 ppi gözenek yoğunluğundaki açık gözenekli alüminyum alaşımı köpük ile Şekil 8.31b'de boş kalıba A383 alüminyum alaşımının dökülmesi ile elde edilen alüminyum levhanın X-ışını mikro bilgisayarlı tomografi (mikro-CT) tekniği ile taranan görüntüleri verilmektedir. Alüminyum köpüğün morfolojik yapısına bakıldığında açık gözenek boşlukları, kırıntı yapılarının hücreli tomografisi görülmektedir (Şekil 8.31a). A383 alüminyum alaşımının dökülmesi ile elde edilen alüminyum levhada döküm hatalarından dolayı küçük gözenekli döküm boşlukları içeren kütleli alaşımlı levha görülmektedir (Şekil 8.31b).



Şekil 8.31: a) 20 ppi gözenek yoğunluğundaki açık gözenekli alüminyum alaşımı köpüğün ve b) A383 alüminyum alaşımı levhanın mikro-CT ile elde edilen morfolojik yapı görüntüleri.

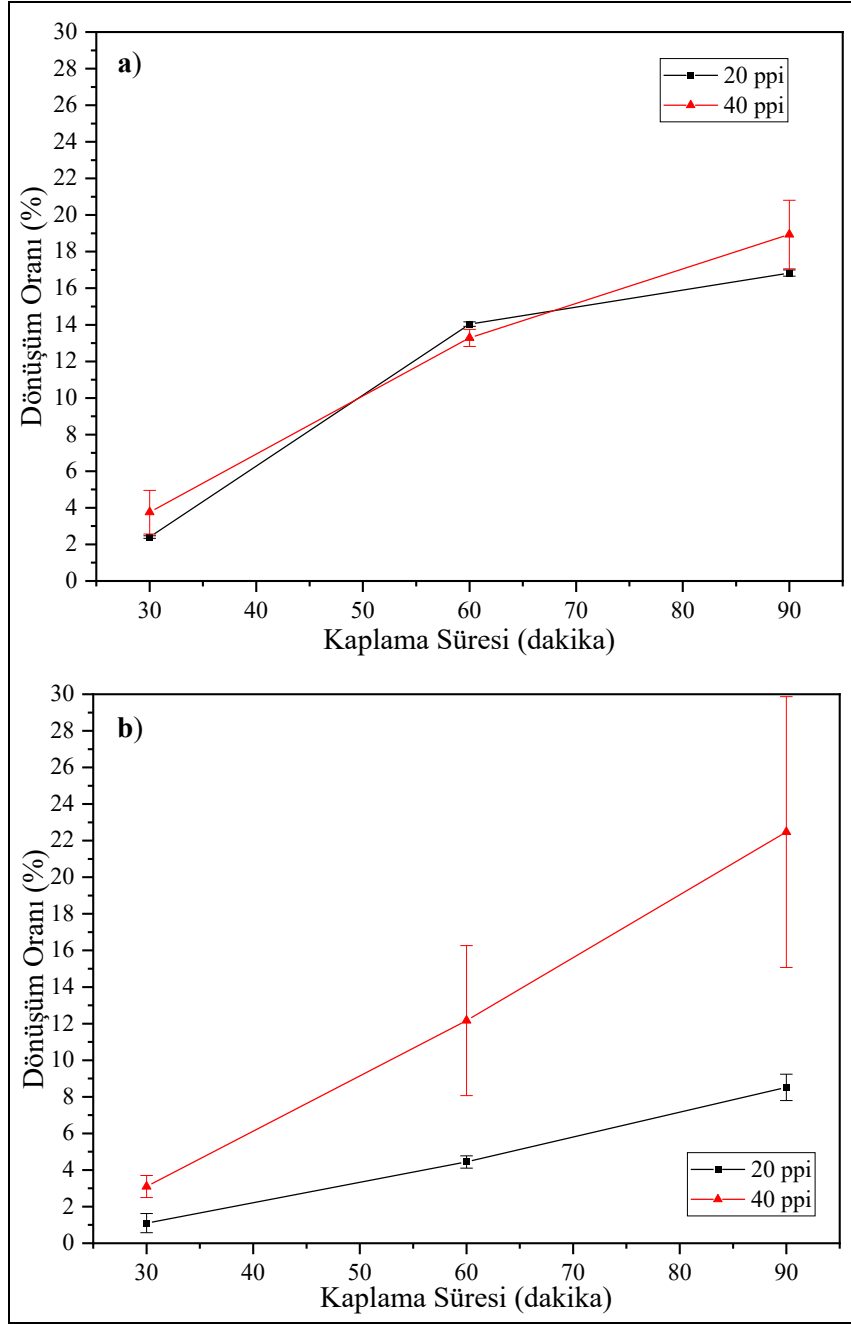
Şekil 8.32’de 20 ppi ve 40 ppi olan gözenek yoğunluklarındaki 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde PEO ile 30, 60 ve 90 dakika sürelerde seramik kaplandıktan sonra gözeneklerine vakum destekli basınçlı döküm ile A383 alüminyum alaşımının infiltre edilmesi sonucunda üretilen kompozit levhalarda morfolojik yapıların tahribatsız mikro-CT görüntüleri gösterilmektedir. Üretilen kompozit levhaların mikro-CT ile derinlemesine karakterize ve analiz edildiğinde A383 alüminyum alaşımının tüm PEO ile seramik kaplanan gözenekli köpüklere nüfuz ettiği ve bazı kısımlarda da seramik kaplanan gözenekli yapılara nüfuz etmediği görülmektedir. Nüfuz etmeyen bölgelerde alüminyumun infiltrasyonu işlemi esnasında muhtemelen A383 alüminyum alaşımının erken katılaşma göstermesi nedeniyle gözeneklerin tam olarak doldurulmadığı gözlenebilmektedir. Genel olarak tüm alana bakıldığında infiltrasyon işleminin başarıyla uygulandığı görülmektedir.



Şekil 8.32: 20 ppi için a)30 dakika, b) 60 dakika ve c) 90 dakika ile 40 ppi için d)30 dakika, e) 60 dakika ve f) 90 dakika PEO kaplama sürelerinden üretilen kompozit levhaların mikro-CT ile morfolojik yapı görüntüleri.

### 8.3. Metal/Seramik Dönüşüm Oranları

20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluklarında Şekil 8.33a'da 6101 alüminyum alaşımı, Şekil 8.33b'de 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemeler için PEO işleminden sonra tartılarak hesaplanan dönüşüm oranlarının hesaplanmasıyla oluşturulan grafikler gösterilmektedir. Metal/seramik dönüşüm oranına bakıldığında yaklaşık olarak doğrusal bir hızda ilerlediği fakat 20 ppi yoğunluğundaki 6101 alüminyum alaşımı köpükte 60 dakika kaplama süresinden 90 dakika kaplama süresine dönüşüm oranında düşüş gözlenmesinin nedeni gama alümina fazının alfa alümina fazına dönüşümü ve mullit oluşumu olarak değerlendirilmektedir. 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alüminyum alaşımı köpükte 90 dakika kaplama süresinde dönüşüm oranı yaklaşık %19 olarak; 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpükte ise 90 dakika kaplama süresinde dönüşüm oranı yaklaşık %22 olarak dönüşümün gerçekleştiği görülmektedir. Alaşım farklılığından dolayı kaplama çözeltisi ve kaplama süresi aynı olmasına rağmen alüminyum alaşımının %3'lük dönüşüm oranı farkı gama alümina ve mullit fazlarının oluşmasından kaynaklanmaktadır. 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alüminyum alaşımı köpükte 90 dakika kaplama süresinde dönüşüm oranı yaklaşık %17 olarak; 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpükte ise 90 dakika kaplama süresinde dönüşüm oranı yaklaşık %9 olarak dönüşümün gerçekleştiği görülmektedir. Alaşım farklılığından dolayı kaplama çözeltisi ve kaplama süresi aynı olmasına rağmen alüminyum alaşımının %8'lik dönüşüm oranı farkı 6101 alüminyum alaşımında alfa ve gama alümina ile mullit fazlarının oluşmasından ve 6061 alüminyum alaşımında sadece alfa ve gama alümina fazlarının oluşmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 8.33: PEO işleminden sonra tartılarak a) 6101 alüminyum alaşımı ve b) 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemeler için hesaplanan dönüşüm oranlarının kaplama süresi ile değişimi.

## 8.4. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Tablo 8.6 ve Tablo 8.7’de 6101 ve 6061 alaşımı alüminyum köpüklerin PEO kaplama işlemi öncesi ve sonrası 30, 60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde ölçülen özgül ağırlık, bağıl yoğunluk ve % gözeneklilik değerleri verilmektedir. Her iki alaşım türü için kaplamasız alüminyum alaşımı köpük ile karşılaştırıldığında PEO işleminden sonra özgül ağırlık ve bağıl yoğunluk değerleri artmakta; gözeneklilik oranları ise azalmaktadır. Alüminyum alaşımının ( $\rho_{Al}=2,7 \text{ g/cm}^3$ ) yüzeyinde oluşan alümina fazları ( $\rho_{Al_2O_3}=3,95 \text{ g/cm}^3$ ) seramik kaplanan köpüklerin özgül ağırlığının artmasına neden olmaktadır.

6101 alüminyum alaşımı köpük yüzeyinde PEO işleminden sonra özgül ağırlığın ve bağıl yoğunluğun arttığı ve 20 ppi gözenek yoğunluğundaki köpükte 30 dakika kaplama süresinde en yüksek değerde ölçüldüğü görülmektedir (Tablo 8.6). Şekil 8.29a’da XRD analizinde görüldüğü üzere 30 dakika kaplama süresinde yüzeyde çoğunlukla alümina fazının oluşması özgül ağırlık ve yoğunluk değerlerinin en yüksek ölçülmesine neden olmuştur. Kaplama süresi ile alümina fazının mullit ( $\rho_{mullit}=3,05 \text{ g/cm}^3$ ) fazına dönüşümü özgül ağırlık ve yoğunluk değerlerinde azalmaya neden olmaktadır. 40 ppi gözenek yoğunluğundaki köpüklerde ise gözeneklilik oranının yüksek olması yani alüminyumun kapladığı hacmin azalması, bu gözenek yoğunluğunda özgül ağırlık ve bağıl yoğunluk değerlerinin 20 ppi gözenek yoğunluğundaki köpüklere göre düşük ölçülmesine neden olmuştur. 30 dakika kaplama süresinde yüzeyde oluşan gama alümina fazının 60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde alfa alümina ve mullit fazlarına dönüşümü artarak ve aynı zamanda kaplama kalınlığının artması ile yoğunluk değerlerinin de artmasına neden olmaktadır (Şekil 8.33b). Gözeneklilik yüzdesinin düşmesinin nedeni kaplama süresi ile kaplama kalınlığının, dolayısıyla giriş kalınlığının artması ve bu sonucunda gözenek boyutunda gerçekleşen küçülmedir.

Tablo 8.6: 6101 alaşımlı köpük malzemelerin kaplamasız ve PEO sonrası yoğunluk değerleri.

| Gözenek Yoğunluğu (ppi) | PEO Kaplama Süresi (dakika) | Özgül Ağırlık, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Bağıl Yoğunluk, $\rho^*/\rho_k$ (%) | Gözeneklilik (%) |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| 20                      | Kaplamasız                  | 0,33 ± 0,03                                | 12 ± 0,01                           | 87,87 ± 1,08     |
|                         | 30                          | 0,37 ± 0,01                                | 14 ± 0,0                            | 86,22 ± 0,21     |
|                         | 60                          | 0,36 ± 0,0                                 | 14 ± 0,0                            | 86,48 ± 0,0      |
|                         | 90                          | 0,36 ± 0,0                                 | 13 ± 0,0                            | 86,69 ± 0,14     |
| 40                      | Kaplamasız                  | 0,29 ± 0,02                                | 11 ± 0,01                           | 89,12 ± 0,62     |
|                         | 30                          | 0,29 ± 0,01                                | 11 ± 0,0                            | 89,27 ± 0,36     |
|                         | 60                          | 0,33 ± 0,03                                | 12 ± 0,01                           | 87,80 ± 1,16     |
|                         | 90                          | 0,36 ± 0,02                                | 13 ± 0,01                           | 86,50 ± 0,79     |

20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımlı köpüklerin yüzeyinde PEO işleminden sonra özgül ağırlıkta bir miktar artma, bağıl yoğunluk değerlerinde ise değişme olmadığı görülmektedir (Tablo 8.7). Bunun nedeni, 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alüminyum alaşımlı köpükler ile karşılaştırıldığında ortalama kaplama kalınlığı (Şekil 8.21) ve ortalama dönüşüm oranı (Şekil 8.33b) değerlerinin düşük olması olarak gösterilebilmektedir. 40 ppi gözenek yoğunluğundaki köpüklerde ise ortalama kaplama kalınlığı ile ortalama dönüşüm oranı değerlerinin artması, özgül ağırlık ve bağıl yoğunluk değerlerinin artmasına neden olmuştur.

Tablo 8.7: 6061 alaşımlı köpük malzemelerin kaplamasız ve PEO sonrası yoğunluk değerleri.

| Gözenek Yoğunluğu (ppi) | PEO Kaplama Süresi (dakika) | Özgül Ağırlık, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Bağıl Yoğunluk, $\rho^*/\rho_k$ (%) | Gözeneklilik (%) |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| 20                      | Kaplamasız                  | 0,31 ± 0,0                                 | 12 ± 0,0                            | 88,48 ± 0,13     |
|                         | 30                          | 0,32 ± 0,0                                 | 12 ± 0,0                            | 88,31 ± 0,0      |
|                         | 60                          | 0,33 ± 0,0                                 | 12 ± 0,0                            | 87,94 ± 0,0      |
|                         | 90                          | 0,32 ± 0,0                                 | 12 ± 0,0                            | 88,03 ± 0,0      |
| 40                      | Kaplamasız                  | 0,29 ± 0,02                                | 11 ± 0,01                           | 89,26 ± 0,33     |
|                         | 30                          | 0,29 ± 0,0                                 | 11 ± 0,0                            | 89,20 ± 0,0      |
|                         | 60                          | 0,35 ± 0,0                                 | 13 ± 0,0                            | 87,08 ± 0,0      |
|                         | 90                          | 0,37 ± 0,0                                 | 14 ± 0,0                            | 86,40 ± 0,0      |

Tablo 8.8’de üretilen kompozit levhaların ve A383 alaşımı levhanın özgül ağırlığı ve yoğunluk değerleri verilmektedir. Üretilen kompozit levhalar gözenekteki A383 alaşımının infiltrasyonuna bağlı olarak yoğunlukta değişim görülmektedir. A383 alaşımı levhada döküm boşlukları olduğu için yoğunluk farkları tespit edilmektedir. Özgül ağırlık değerlerine bakıldığında kompozit levhalar seramik kaplamaların oluşumuna göre kütleli durumdaki A383 alaşımının hacim oranlarına göre değişim göstermektedir. A383 alaşımlı levhanın özgül ağırlık değerleri ile kompozit levhaların özgül ağırlık değerlerine bakıldığında, 20 ppi gözenek yoğunluğuna sahip kompozit levhaların gözeneklerine A383 alaşımının tamamen nüfuz etmesinden kaynaklı özgül ağırlıkları 40 ppi gözenek yoğunluğuna göre artmıştır.

Tablo 8.8: Üretilen kompozit levhaların ve A383 alaşımı levhanın özgül ağırlık ve yoğunluk değerleri.

| Malzeme        | Gözenek Yoğunluğu (ppi) | PEO Kaplama Süresi (dakika) | Özgül Ağırlık, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | Yoğunluk, $d$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|
| A383           | -                       | -                           | 2,65                                       | 2,62 ± 0,01                        |
| Kompozit Levha | 20                      | 30                          | 2,64 ± 0,01                                | 2,65 ± 0,0                         |
|                |                         | 60                          | 2,62 ± 0,01                                | 2,64 ± 0,01                        |
|                |                         | 90                          | 2,64 ± 0,03                                | 2,66 ± 0,0                         |
|                | 40                      | 30                          | 2,63 ± 0,02                                | 2,66 ± 0,03                        |
|                |                         | 60                          | 2,60 ± 0,04                                | 2,69 ± 0,01                        |
|                |                         | 90                          | 2,60 ± 0,01                                | 2,63 ± 0,03                        |

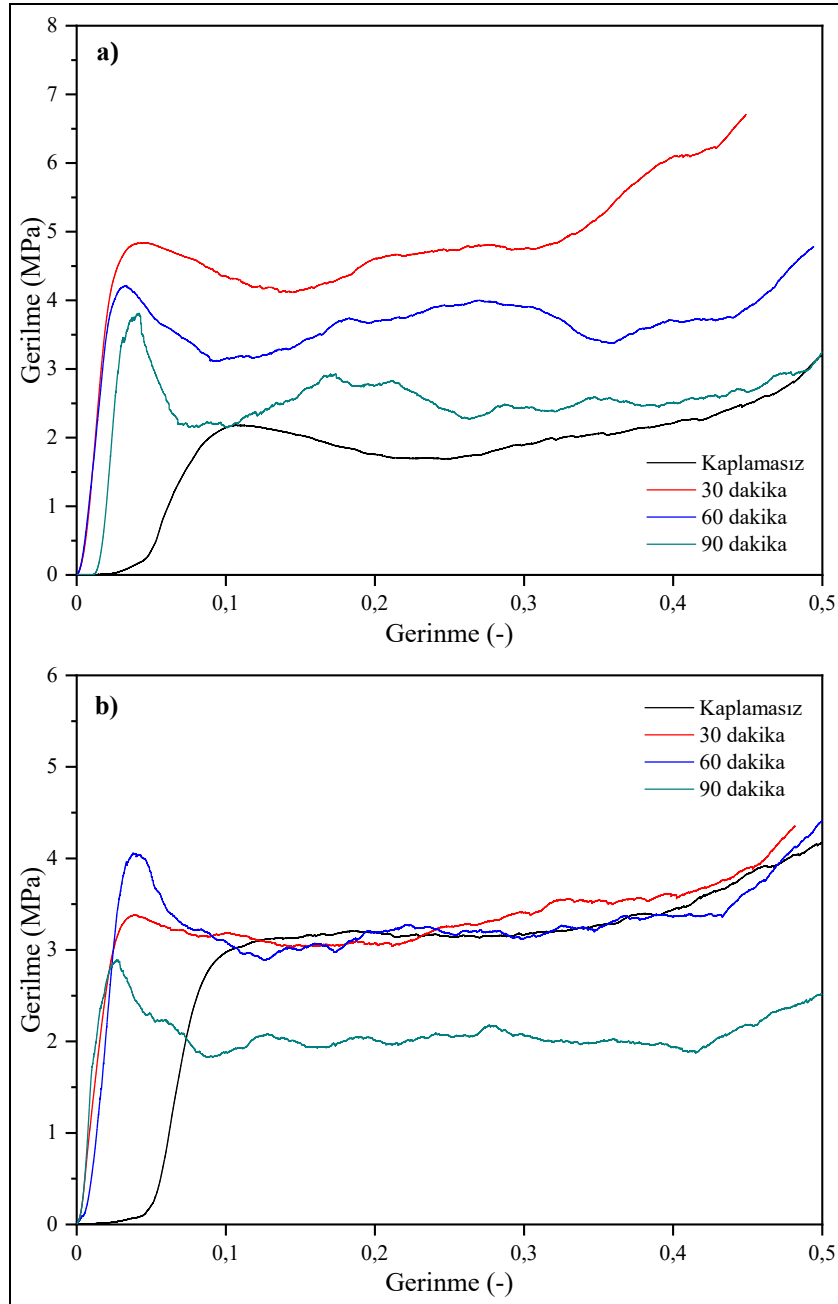
## 8.5. Mekanik Test Sonuçları

### 8.5.1. Basma Test Sonuçları

Şekil 8.34 ve Şekil 8.35'te sırasıyla 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki 6101 ile 6061 alüminyum alaşımları köpüklerin kaplamasız olarak ve PEO yöntemiyle yüzeyleri seramik kaplandıktan sonra basma testinden elde edilen gerilme-gerinme eğrileri gösterilmektedir. Seramik kaplanan alüminyum alaşımı köpükler bir başlangıç doğrusal elastik (yarı-elastik deformasyon) bölge, genişletilmiş bir plato (durağan) bölgesi ve son olarak yoğunlaşma (sıkıştırma) bölgesini içeren, sünek metal köpük basma gerilme-gerinme eğrisine benzer bir eğri sergilemektedir. Genişletilmiş plato bölgesinde gözenekler kalıcı olarak biçim değiştirirken gerilme yavaş yavaş artmakta; yoğunlaşma bölgesinde ise çöken gözenekler birlikte sıkıştırılmaktadır. Kaplamasız alüminyum alaşımı köpüklerin ve seramik kaplanan köpüklerin bu biçim değiştirme özelliklerinin literatürde verilen diğer metal köpükler ile benzer olduğu görülmektedir.

Şekil 8.34'te seramik kaplanan köpüklerde doğrusal elastik bölgenin ( $\leq 0,05$ ) kaplamasız 6101 alüminyum alaşımı köpüklere ( $\leq 0,1$ ) göre çok küçük gerinmede ortaya çıktığı görülmektedir. 20 ppi gözenek yoğunluğundaki seramik ile kaplanan alüminyum alaşımı köpüklerin tüm kaplama sürelerinde uygulanan basma yükü altında kaplamasız alüminyum alaşımı köpüklere göre daha iyi bir performans sergilemektedir. Tablo 8.9'da kaplamasız ve PEO işlemi ile kaplanan 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin ölçülen ve hesaplanan ortalama mekanik değerleri verilmektedir. Basma gerilmesi, akma gerilmesi, özgül mukavemet ve enerji sönümlleme kapasitesi değerleri 30 dakika sürede kaplanan alüminyum alaşımı köpükte kaplamasız alüminyum alaşımı köpüğe göre en yüksek düzeye ulaşmaktadır (Tablo 8.9) ve plato bölgesi dar bir alan sergilemektedir (Şekil 8.34a). PEO işleminden sonra artan bağıl yoğunluk (Tablo 8.6) ile plato bölgesi kısalmakta ve aynı zamanda akma gerilmesi artmaktadır. Benzer şekilde, yoğunlaşma gerinmesinin bağıl yoğunluğa duyarlı olduğu ve bağıl yoğunluğun artmasıyla yoğunlaşma gerinmesinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, daha düşük yoğunluklu köpüğün hücre kırılganlığının çökmesi ve biçim değiştirmesi için daha fazla fırsat sağlamasından kaynaklanmaktadır. Şekil 8.34'te bağıl yoğunlukla birlikte enerji sönümlleme kapasitesinin arttığı görülebilmektedir. Çünkü akma gerilmesi bağıl yoğunlukla artmaktadır, dolayısıyla gerilme-gerinme

eğrisi altındaki alan da artmaktadır. Bu ayrıca bağıl yoğunluğun köpüklerin mekanik özelliklerini belirleyen en önemli değişken olduğunu göstermektedir.



Şekil 8.34: a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki kaplamasız ve PEO yöntemi ile 30, 60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde kaplanan 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin basma testi gerilme-gerinme eğrileri.

Gerilme-gerinme eğrilerinde basma gerilme değerleri 60 dakika kaplama süresinde bir miktar azalırken 90 dakika kaplama süresinde sabit kalmakta; elastik modülü ise artan kaplama süresi ile artmaktadır (Tablo 8.9). PEO işlemi ile kaplanan

alüminyum köpüklerde elastik modülünün yüksek olmasının nedeni kiriş yüzeylerinde seramik fazlarının (mullit, gama alümina ve alfa alümina) oluşmasıyla sertliğin artması olarak değerlendirilmektedir. Köpüğün mekanik özelliklerindeki artış, yüksek elastik modüle sahip olduğu bilinen yüzeyde oluşturulan seramik yüzey kaplamasından kaynaklanmaktadır (artan  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazı içeriğinin ve kütleli metal ile çok yüksek ara yüzey bağ mukavemetinin bir sonucu olarak) [Yerokhin et al., 1999].

6101 alüminyum alaşımı köpüklerin basma testinden ölçülen elastik modülü 103,03 MPa ve basma gerilmesi değeri 2,53 MPa olarak bilinmektedir [ERG Inc. Oakland, 2021]. Bu çalışmada kaplamasız köpüğe uygulanan basma testinde yakın değerlerde basma gerilmesi (2,34 MPa) ve elastik modülü (61 MPa) elde edilirken, kaplamalı köpüklerde bu değerler artmıştır [Cavuslu et al., 2019]. Literatürde sinterleme ile üretilen gama alümina için elastik modülü  $253 \pm 22$  GPa [Gallas and Piermarini, 1994], alfa alümina için 338-416 GPa [MUNRO, 1997] ve mullit için ise 195-202 GPa [Osendi and Baudin, 1996] olarak bilinmektedir.

Tablo 8.9: Kaplamasız ve PEO yöntemi ile kaplanan 6101 alaşımı alüminyum köpüklerin ölçülen ve hesaplanan ortalama mekanik değerleri.

| Gözenek Yoğunluğu (ppi) | PEO Kaplama Süresi (dakika) | Basma Gerilmesi, $\sigma_b$ (MPa) | Akma Gerilmesi, $\sigma_a$ (MPa) | Özgül Mukavemet, $\sigma_a/\rho$ (MPa/(g/cm <sup>3</sup> )) | Elastik Modülü, $E^*$ (MPa) | Enerji Sönümleme Kapasitesi $W_v$ (MJ/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| 20                      | Kaplamasız                  | $2,4 \pm 0,4$                     | $1,8 \pm 0,1$                    | $5,8 \pm 0,2$                                               | $61 \pm 19$                 | $0,54 \pm 0,13$                                        |
|                         | 30                          | $4,5 \pm 0,6$                     | $4,0 \pm 0,5$                    | $10,5 \pm 1,3$                                              | $185 \pm 56$                | $1,19 \pm 0,12$                                        |
|                         | 60                          | $4,0 \pm 0,4$                     | $3,6 \pm 0,3$                    | $10,2 \pm 0,6$                                              | $198 \pm 16$                | $0,94 \pm 0,12$                                        |
|                         | 90                          | $4,0 \pm 0,0$                     | $3,6 \pm 0,2$                    | $10,0 \pm 0,5$                                              | $222 \pm 26$                | $0,77 \pm 0,04$                                        |
| 40                      | Kaplamasız                  | $3,1 \pm 0,1$                     | $2,5 \pm 0,1$                    | $8,7 \pm 0,5$                                               | $85 \pm 5$                  | $0,72 \pm 0,02$                                        |
|                         | 30                          | $3,2 \pm 0,2$                     | $3,0 \pm 0,1$                    | $9,9 \pm 0,1$                                               | $125 \pm 9$                 | $0,82 \pm 0,08$                                        |
|                         | 60                          | $3,3 \pm 1,1$                     | $3,0 \pm 0,8$                    | $9,1 \pm 1,9$                                               | $144 \pm 25$                | $0,79 \pm 0,13$                                        |
|                         | 90                          | $3,3 \pm 0,5$                     | $2,8 \pm 0,7$                    | $7,6 \pm 1,6$                                               | $179 \pm 14$                | $0,68 \pm 0,07$                                        |

Kaplamasız alüminyum köpüklerde, kirişlerde gerçekleşen yüksek miktarda kalıcı biçim değiştirme, çatlak oluşumu ve büyümesi, plato bölgesindeki enerji soğurma kapasitesini artırmaktadır. Yoğunlaşma bölgesinde, kalıcı bel verme veya kirişlerin kırılması gibi daha az enerji tüketen mekanizmalar nedeniyle enerji soğurma verimliliği azalmaktadır [Schüler et al., 2013]. PEO kaplamaların düşük yoğunluklu alüminyum köpüklere uygulanmasının sertliklerini artırabileceği görülmektedir.

Ancak yüzeyi kaplanan köpükler için ölçülen elastik modülü, belirgin olarak kaplama kalınlığı ile azalmaktadır. Alüminyum köpüklerin PEO ile kaplanması sırasında, %90'a varan oranda bir metalin seramik kaplamaya dönüştürülebileceği tespit edilmiştir. Bunun sonucunda çekirdek metalin hacminin azalacağı ve malzemenin genel davranışının giderek daha kırılğan olacağı anlamına gelmektedir [Dunleavy et al., 2011].

20 ppi gözenek yoğunluğundaki seramik kaplanan köpüklerin basma mukavemet değerlerindeki artış, 40 ppi gözenek yoğunluğundaki seramik kaplanan köpüklerden daha fazla olduğu görülmektedir. 40 ppi gözenek yoğunluğundaki seramik kaplanan köpüklerde metal/seramik dönüşüm oranının yüksek olması, alüminyum kırıların seramik karakterde davranış sergilemesine ve gevrek kırılmaya neden olarak basma mukavemet değerlerindeki artışı sınırlamaktadır.

Şekil 8.35a'da 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpüklerden kaplamasız ile 30 ve 90 dakika kaplama sürelerinde seramik kaplanan köpüklerde doğrusal elastik bölge yaklaşık olarak 0,1'den küçük bir gerinmede ortaya çıkmakta iken, 60 dakika kaplama süresinde yaklaşık olarak 0,05'ten küçük bir gerinmede ortaya çıkmaktadır. 60 dakika kaplama süresinde gerilme-gerinme eğrisi başlangıçta dik bir doğrusal elastik bölgesi sergileyerek 90 dakika kaplama süresi ile benzer bir plato ve yoğunlaşma bölgeleri sergilemektedir. 30 dakika kaplama süresinde ise en yüksek basma gerilmesi değerinden sonra bir miktar azalarak kaplamasız köpük ile benzer bir eğilim göstermektedir. Basma gerilmesi, akma gerilmesi, özgül mukavemet ve enerji sönümleme kapasitesi değerleri 30 dakika sürede kaplanan alüminyum alaşımı en yüksek düzeye ulaşmaktadır (Tablo 8.10). Kaplama süresi arttıkça basma gerilme değerleri azalmaktadır. 40 ppi gözenek yoğunluğundaki alüminyum alaşımı köpüklerin PEO işlemi ile kaplanmasından sonra uygulanan basma testleri neticesinde basma eğrileri tüm kaplama sürelerinde kaplamasız köpüğün basma eğrisi ile karşılaştırıldığında düşük basma mukavemet değerleri sergilemektedir. 90 dakika kaplama süresinde ise en düşük basma gerilmesi değeri tespit edilmiştir. 90 dakika kaplama süresinde köpük yüzeyinde metal/seramik dönüşüm oranının yüksek olması köpüğün bağıl yoğunluğunun yüksek olmasına rağmen seramik yoğunluğundaki artış gevrek kırılma biçiminde hasara uğramasına neden olmaktadır (Şekil 8.35b).

Benzer gözenek yoğunluğu için köpük malzemelerin eğilme momenti, köpükleri oluşturan kırıların nötr eğilme ekseninden etkilendiği için bağıl yoğunluk ile ilişkili

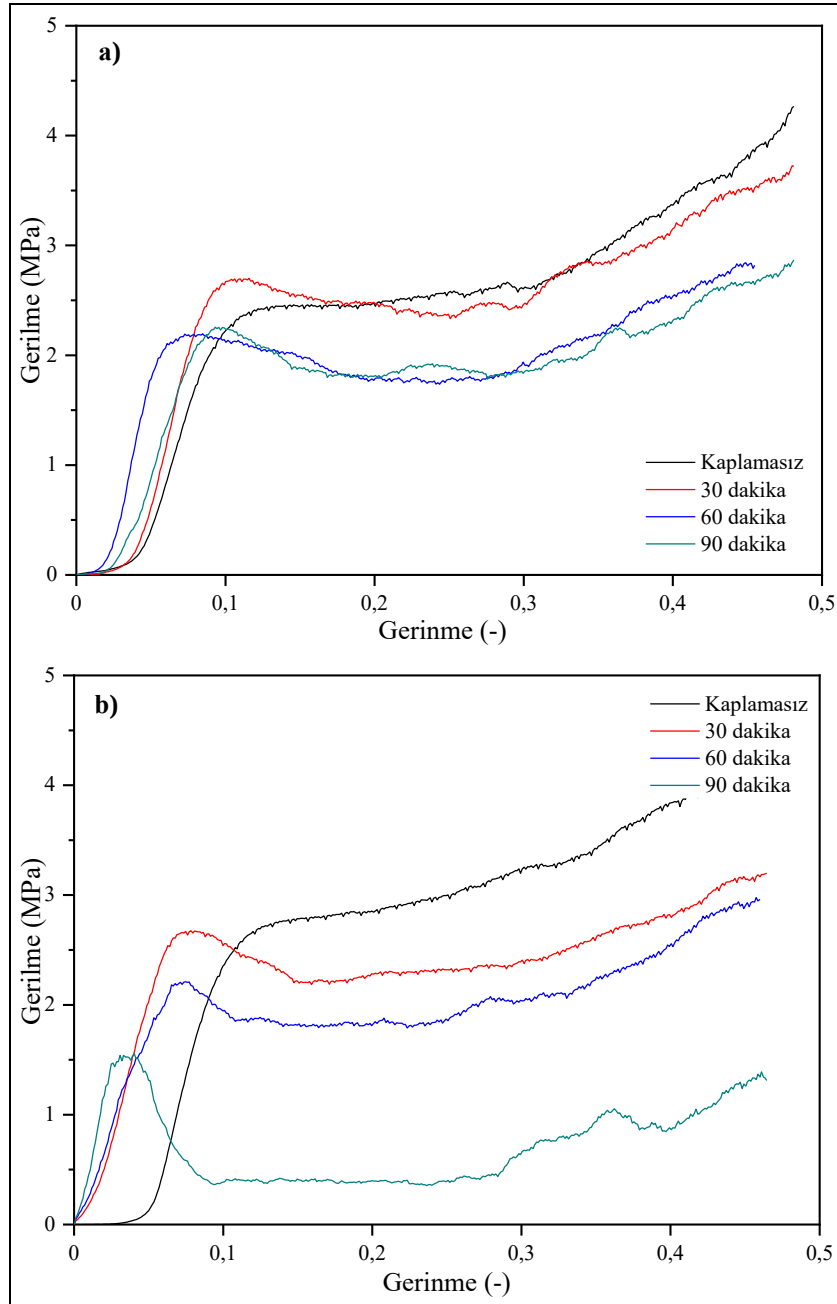
olduğu bilinmektedir [Bele et al., 2011]. Açık gözenekli Ni köpük bir malzemenin basma testinden yapılan bir çalışmada yanal hücrelerinin kırışlarında çatlakların başladığı ve çatlak ilerledikçe, bir kırış kırılmakta ve yük bir sonraki hücrelere yeniden dağıtılmaktadır. Başlangıçta çatlak, gözenek kırışında başlamaktadır, ancak daha fazla biçim değiştirme, birkaç kırışte neredeyse aynı anda bir çatlak başlangıcına neden olmaktadır ve sonunda bir kırılma bölgesinin oluşumuna yol açmaktadır. Bu bölgede, kırışların küçük çatlakları birleşerek sonunda köpük yapısı boyunca yayılan bir ana çatlak oluşturmaktadır [Michailidis et al., 2008].

Tablo 8.10: Kaplamasız ve PEO yöntemi ile kaplanan 6061 alaşımı alüminyum köpüklerin ölçülen ve hesaplanan ortalama mekanik değerleri.

| Gözenek Yoğunluğu (ppi) | PEO Kaplama Süresi (dakika) | Basma Gerilmesi, $\sigma_b$ (MPa) | Akma Gerilmesi, $\sigma_a$ (MPa) | Özgül Mukavemet, $\sigma_a/\rho$ (MPa/(g/cm <sup>3</sup> )) | Elastik Modülü, $E^*$ (MPa) | Enerji Sönümleme Kapasitesi $W_v$ (MJ/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| 20                      | Kaplamasız                  | 2,8 ± 0,4                         | 2,0 ± 0,2                        | 6,5 ± 0,5                                                   | 47,2 ± 7,8                  | 0,64 ± 0,19                                            |
|                         | 30                          | 2,9 ± 0,3                         | 2,6 ± 0,3                        | 8,2 ± 0,9                                                   | 53,2 ± 2,2                  | 0,68 ± 0,08                                            |
|                         | 60                          | 2,3 ± 0,1                         | 1,7 ± 0,2                        | 5,2 ± 0,5                                                   | 108 ± 56,3                  | 0,58 ± 0,07                                            |
|                         | 90                          | 2,1 ± 0,3                         | 1,8 ± 0,2                        | 5,6 ± 0,6                                                   | 45,4 ± 2,2                  | 0,45 ± 0,03                                            |
| 40                      | Kaplamasız                  | 2,8 ± 0,2                         | 1,8 ± 0,1                        | 6,2 ± 0,4                                                   | 49,9 ± 6,4                  | 0,58 ± 0,05                                            |
|                         | 30                          | 2,6 ± 0,1                         | 2,3 ± 0,0                        | 7,9 ± 0,2                                                   | 52 ± 2,2                    | 0,62 ± 0,01                                            |
|                         | 60                          | 2,1 ± 0,1                         | 1,9 ± 0,6                        | 5,4 ± 1,8                                                   | 47,2 ± 4,6                  | 0,49 ± 0,04                                            |
|                         | 90                          | 1,6 ± 0,0                         | 1,4 ± 0,0                        | 3,9 ± 0,0                                                   | 73,7 ± 0,0                  | 0,2 ± 0,03                                             |

PEO kaplama işlemi sonrasında 6101 alaşımı alüminyum köpüklerden 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki köpükler artan bağıl yoğunluk ile daha yüksek basma gerilmesi, akma gerilmesi, özgül mukavemet ve enerji sönümleme kapasitesi sergilerken; 6061 alaşımı alüminyum köpüklerden 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki köpüklerin daha düşük basma gerilmesi, akma gerilmesi, özgül mukavemet ve enerji sönümleme kapasitesi sergilemekte olduğu görülmektedir. 6061 alüminyum alaşımı köpüklerde metal/seramik dönüşüm oranlarının yüksek olması gevrek kırılma sergilediği için metal/seramik dönüşüm oranı kritik bir öneme sahip olmaktadır. Kaplama kalınlığı arttıkça, elastik bölgedeki (sertlikteki) ilk artışa rağmen, genel köpük davranışını kontrol etmede kaplama içindeki hasarın etkisinin daha güçlü hale geldiğini göstermektedir. Daha kalın PEO kaplamalar, daha yüksek hasar oranına

yol açacak olan daha büyük kusur yoğunluğu (mikro çatlaklar ve gözenekler) geliştirme eğiliminde olmaktadır (Şekil 8.18 ve Şekil 8.19).



Şekil 8.35: a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki kaplama-sız ve PEO yöntemi ile 30, 60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde kaplanan 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin basma testi gerilme-gerinme eğrileri.

Benzer bir çalışmada, bu tez çalışmasında da kullanılan açık gözenekli 6101 alüminyum alaşımı köpüğün (Duocel) PEO ile kaplanmasından sonra akma mukavemetinde önemli bir artış olmadığı tespit edilmiştir [Dunleavy et al., 2011].

Başka bir çalışmada, boşluk tutucu tekniği ile üretilen yüksek yoğunluklu ( $1-1,6 \text{ g/cm}^3$ ) alüminyum köpüklere uygulanan basma testinde, ölçülen özgül mukavemet değerlerinin kaplamasız köpük için  $3,6 \text{ MPa/(g/cm}^3)$  ve PEO kaplamalı köpük için ise en fazla  $8,6 \text{ MPa/(g/cm}^3)$  olarak bulunduğu bildirilmiştir. Aynı çalışmada, açık gözenekli 6101 alüminyum alaşımı köpüğün (Duocel) çekme testinden PEO kaplama için elde edilen en yüksek özgül mukavemet değerinin  $9,2 \text{ MPa/(g/cm}^3)$ , kaplamasız köpük için ise  $8,5 \text{ MPa/(g/cm}^3)$  olarak tespit edilmiştir [Abdulla et al., 2011]. Literatürde, bu değişkenlerdeki artışlar, nano kristalli nikel kaplamalı köpüklerin basma testlerinde de elde edilmiştir [Bouwhuis et al., 2009]. Bu tez çalışmasında, 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alüminyum alaşımı köpüğün 30 dakika süreyle kaplanmasından sonra uygulanan basma testinden elde edilen ortalama özgül mukavemet değeri  $10,5 \text{ MPa/(g/cm}^3)$  olarak hesaplanarak, kaplamasız alüminyum köpüğe oranla %81 artış tespit edilmiştir [Cavuslu et al., 2019].

Bağıl yoğunlukla birlikte enerji sönümleme kapasitesinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, akma gerilmesinin bağıl yoğunlukla artmasıdır, dolayısıyla gerilme-gerinme eğrisi altındaki alan da artmaktadır. Benzer sonuçlar, literatürde de bildirilmektedir; köpüklerin bağıl yoğunlukları ne kadar yüksek olursa, plato bölgesi o kadar kısa olmakta, ancak daha yüksek yoğunluklar aynı zamanda daha yüksek akma gerilmeleri anlamına gelmektedir [Wang et al., 2006]. Tüm köpüklerin enerji sönümleme kapasitelerinin hesaplanmasına göre 6101 alüminyum alaşımı köpük malzemelerde PEO ile kaplanan 20 ppi gözenek yoğunluğundaki köpüğün, PEO ile kaplanan 40 ppi köpükten daha fazla enerji sönümlendiği tespit edilmektedir. Birim köpük hacmi başına emilen enerji, artan kaplama süresi ile azalmaktadır. 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin 40 ppi ve 20 ppi gözenek yoğunluklarındaki ölçülen gözenek boyutları 0,864 ve 1,037 mm olduğundan, 40 ppi köpüğün giriş kalınlığı 20 ppi köpüğe göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle, alüminyum kirişlerin seramik kaplamaya dönüşüm oranı, 40 ppi gözenek yoğunluğu için daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 8.33b). Basma yükü altında kiriş yapılarda akma başlar başlamaz kaplama neredeyse tamamen bükülme eğilimi gösterirken kaplamasız alüminyum köpüklerde kirişler neredeyse sabit bir plato bölgesi sergileyerek eğilme davranışı göstermektedir. Plastik şekil değiştiren alüminyum kirişlerin aksine, seramik kaplama kırılğan bir şekilde hasara uğramaktadır. Bunun nedeni, kaplamanın yüzeyinde PEO ile oluşan mikro çatlakların ve gözeneklerin bulunmasından kaynaklanmaktadır. Kaplama işlemi sırasında mikro deşarjların neden olduğu ısıl gerilmeler, çatlak

oluşumuna yol açmaktadır. 6061 alüminyum alaşımı köpüklerde 60 dakika ve 90 dakika kaplama sürelerinde gözlemlenen ve mekanik özellikleri olumsuz etkileyen, yüzey boyunca dağılmış mikro gözeneklere sahip olmaktadır. Artan mullit fazı ve mikro gözenek oluşumu nedeniyle daha uzun işlem süreli kaplamaların özgül mukavemeti, daha kısa işlem süresine (30 dakika) göre daha az olduğu görülmektedir.

PEO ile kaplanan 6101 alüminyum alaşımı köpüklerin akma mukavemetinin, 30 dakika kaplama süresinde en ince kaplamada önemli ölçüde arttırılabildiği görülmektedir. 60 dakika kaplama süresinde daha kalın kaplama ile özellikler artmaya devam etmekte, ancak 90 dakika kaplama süresinde artıştaki eğilim azalmaktadır. 6061 alüminyum alaşımı köpüklerde ise kaplama süresi ile köpükler gevrek kırılğan seramik özellik göstererek akma mukavemeti azalmaktadır.

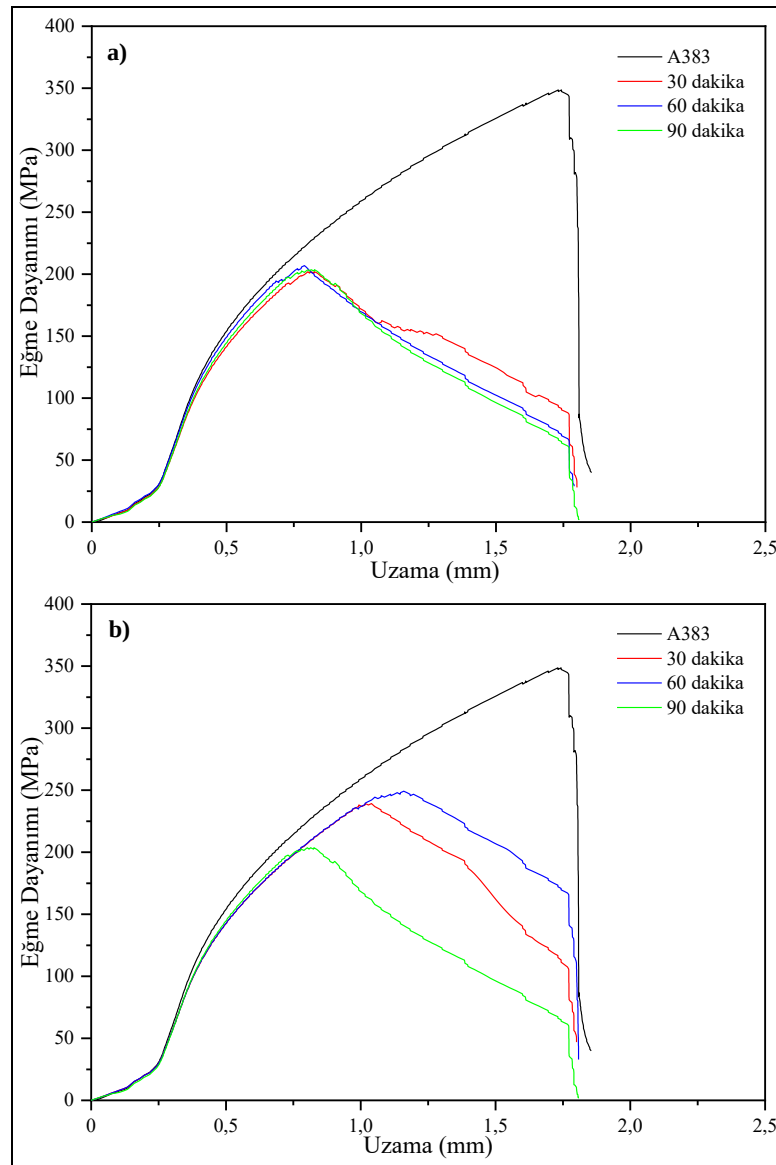
### 8.5.2. Üç Nokta Eğme Test Sonuçları

Eğme deneyi esnasında kompozit levhada yük transferi şu şekilde özetlenebilir; yüzeyine eğme yükü uygulanan kompozit levha (seramik kaplamaya A383 alüminyum alaşımının infiltrasyonu), alüminyum alaşımı aracılığı ile uygulanan yükü PEO kaplamalara transfer etmektedir. Burada yük transferini alüminyum alaşımı, yükün taşınmasını ise seramik kaplama ile sağlanmaktadır. Alüminyum alaşımı ve PEO kaplamalar arasındaki ara yüzey ıslatması başarılı ve bağ mukavemeti yüksek ise bu yük transferi daha başarılıdır. Fakat ıslatma zayıf ve ara yüzey bağ mukavemeti düşük ise ara yüzeydeki mikro boşlukların etkisi ile boşluk etrafından iletilen yük boşluk kenarlarında gerilme yoğunlaşmasına neden olmakta ve bu durumda mukavemetin düşmesine sebebiyet vermektedir.

Nihai üretilen kompozit levhaların eğilme mukavemet değerleri Tablo 8.11’de görüldüğü üzere A383 alüminyum alaşımının eğilme mukavemeti (346 MPa) değerine göre azalmaktadır. Tüm gözenek yoğunluklarında artan PEO kaplama süresi ile ortalama eğilme mukavemeti azalmaktadır. PEO işlem süresi ile kaplama kalınlığı arttıkça, uzun işlem süreleri için alüminyum kirişin seramik kaplamaya dönüşüm oranı daha yüksek olmaktadır. Bu nedenle, alüminyum kiriş gevrek davranış sergileyerek, kirişin eğilme momentinin azalmasına neden olmaktadır. Şekil 8.36’da A383 alüminyum alaşımının maksimum yükten sonra aniden kırıldığı ve kompozit levhaların yavaşça kırıldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni çatlak oluşumu ve yayılması, kaplama/alüminyum matris ara yüzeyi boyunca hareket etmesinden kaynaklanmaktadır. A383 alüminyum, maksimum yüke kadar bir miktar kalıcı biçim değiştirme sergilemektedir. Bunun sebebi ise alüminyum ve alümina kısmi ıslatma davranışı, dolayısıyla bu durumdan kaynaklanan ara yüzeyde mikro gözenek oluşumu ve çatlak ilerlemesinin hızlanarak erken kırılma ve buna paralel mukavemet değerlerinde düşüşe neden olmaktadır.

Tablo 8.11: A383 alüminyum alaşımı ve kompozit levhaların ortalama eğilme mukavemet değerleri.

| Malzeme        | Gözenek Yoğunluğu (ppi) | PEO Kaplama Süresi (dakika) | Ortalama Eğilme Mukavemeti (MPa) |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| A383 Levha     | -                       | -                           | 346                              |
| Kompozit Levha | 20 ppi                  | 30                          | 210,72                           |
|                |                         | 60                          | 207,85                           |
|                |                         | 90                          | 200,52                           |
|                | 40 ppi                  | 30                          | 238,04                           |
|                |                         | 60                          | 219,18                           |
|                |                         | 90                          | 211,22                           |

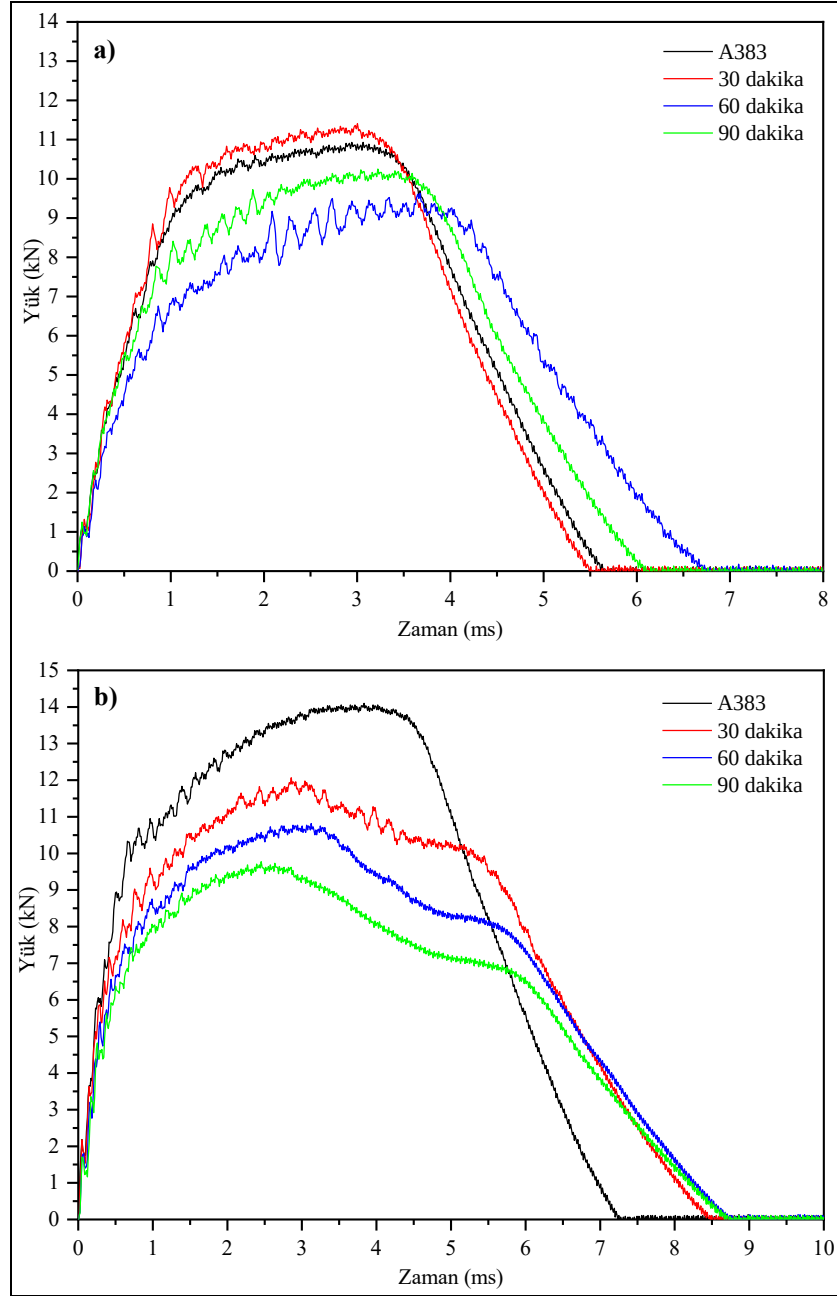


Şekil 8.36: a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarından üretilen kompozit levhaların üç nokta eğme testi eğme dayanımı-uzama grafikleri.

### 8.5.3. Ağırlık Düşürme Darbe Test Sonuçları

A383 alüminyum alaşımı levhalar ile seramik kaplanan 20 ppi ve 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpük yapılara A383 alüminyum alaşımının infiltrasyonu ile üretilen kompozit levhaların 15 J ve 45 J darbe enerjilerine karşılık yük-zaman grafikleri (Şekil 8.37 ve Şekil 8.40), yük-değiştirme grafikleri (Şekil 8.38 ve Şekil 8.41) ve enerji-zaman grafikleri (Şekil 8.39 ve Şekil 8.42) aşağıda verilmektedir. Darbe etkileşimi sonucu soğurulan enerji, kuvvet, yer değiştirme ve zaman değerleri 20 ppi ve 40 ppi için Tablo 8.12’te ve Tablo 8.13’te verilmektedir. Tablo 8.12 ve Tablo 8.13’te verilen  $F_{maks}$  darbe testinde ölçülen maksimum yük (kuvvet) değerini,  $E_{maks}$  maksimum yüke karşılık gelen enerji değerini,  $d_{maks}$  maksimum yüke karşılık gelen yer değiştirmeyi,  $E_s$  darbe sonucu malzeme tarafından soğurulan enerjiyi,  $d_{top}$  toplam yer değiştirmeyi ve  $t_{top}$  toplam darbe zamanını ifade etmektedir.

Şekil 8.37’de gösterilen yük-zaman grafiğinde 15 J darbe enerjisinde eğrilerin yükleme ve boşaltma bölümlerinin tüm levhalar için hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Yük-zaman eğrisinin eğimi 15 J darbe enerjisinde A383 alüminyum alaşımı levha ile karşılaştırıldığında 30 dakika sürede kaplanan kompozit levhada artarken, 60 dakika kaplama süresinde azalmakta ve 90 dakika kaplama süresinde ise A383 alüminyum alaşımı levha ile aynı düzeyde kalmaktadır. Yük-zaman eğrilerinin eğiminin azalmaya başladığı noktada levhalarda ilk hasar oluşmaya başlamaktadır. İlk hasarın 90 dakika kaplama süresinden üretilen kompozit levhada başlamakta (5,37 kN) ve kaplama süresi azaldığında ilk hasarın oluştuğu yük değeri artmaktadır (Şekil 8.37a). Her testin başlangıcından itibaren ön yüzde bölgesel biçim değiştirme gözlemlenmektedir. Tüm levhalarda, darbe ucunun temas ettiği ön yüzde, darbe ucunun çapına karşılık gelen dairesel bir şekilde batma izi oluşmakta ve buna bağlı olarak ezilme ile arka yüzde makro çatlakların oluşmaya başladığı görülmektedir (Şekil 8.8a ve Şekil 8.9), bu da yük-zaman eğrilerinde maksimum yükten sonra yükte düşüşe neden olmaktadır.



Şekil 8.37: 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için yük-zaman grafikleri.

45 J darbe enerjisinde ise yük-zaman eğrilerinin yükleme bölümlerinin hemen hemen aynı olmasına karşın, kompozit levhaların farklı hasar mekanizmaları nedeniyle boşaltma bölümleri farklıdır. Tüm kaplama süreleri için elde edilen eğrilerin eğimi A383 alüminyum alaşımı levha için elde edilen eğrinin eğiminden düşük olmaktadır, ancak artan kaplama süresi ile azalmaktadır. İlk hasar, 15 J darbe enerjinde elde edilen sonuçlara benzer olarak, 90 dakika kaplama süresinden üretilen kompozit levhada başlamakta (5,37 kN) ve kaplama süresi azaldığında ilk hasarın oluştuğu yük

değeri de artmaktadır (Şekil 8.37b). 45 J darbe enerjisinde, kompozit levhalarda maksimum yükten sonra ikinci bir hasar oluşmakta ve belirli bir süre (yaklaşık olarak 3 sn) devam ettikten sonra yük azalmaktadır. A383 alaşımı levhada ön yüzde çökme şeklinde sünek biçim değiştirme hasarı; arka yüzde ise çekme gerilmeleri etkisi altında sünek kırılma ile çatlak boyutu ve uzunluğunda artış olmuştur (Şekil 8.8b). Kompozit levhalarda ise darbe ucunun neden olduğu ilk hasardan sonra yük artmaya devam ederek, maksimum yükte ön yüzde ana fazda çökme şeklindeki sünek biçim değiştirme ile seramik kaplanan kirişler boyunca ayrılma hasar mekanizması şeklinde gevrek kırılma ortaya çıkmaktadır (Şekil 8.10).

Darbe enerjisi 15 J enerji düzeyinden 45 J düzeyine artırıldığında A383 alüminyum alaşımı levha ile 30 dakika ve 60 dakika kaplama sürelerinde yük değerleri artmakta, 90 dakika kaplama süresinde ise azalmaktadır. 15 J darbe enerjisinde 30 dakika kaplama süresi için 11,41 kN maksimum yük değerine, 45 J darbe enerjisinde A383 alüminyum alaşımı levha için 14,10 kN maksimum yük değerine ulaşılmaktadır (Tablo 8.12). Darbe enerjisi arttıkça tepki süresi 15 J enerji değerinde 30 dakika kaplama süresi dışında A383 alüminyum alaşıma göre kompozit levhalarda artmaktadır. Yük değerleri darbe yüklemesi sonunda zaman eksenine paralel konuma gelerek sıfırlanmaktadır.

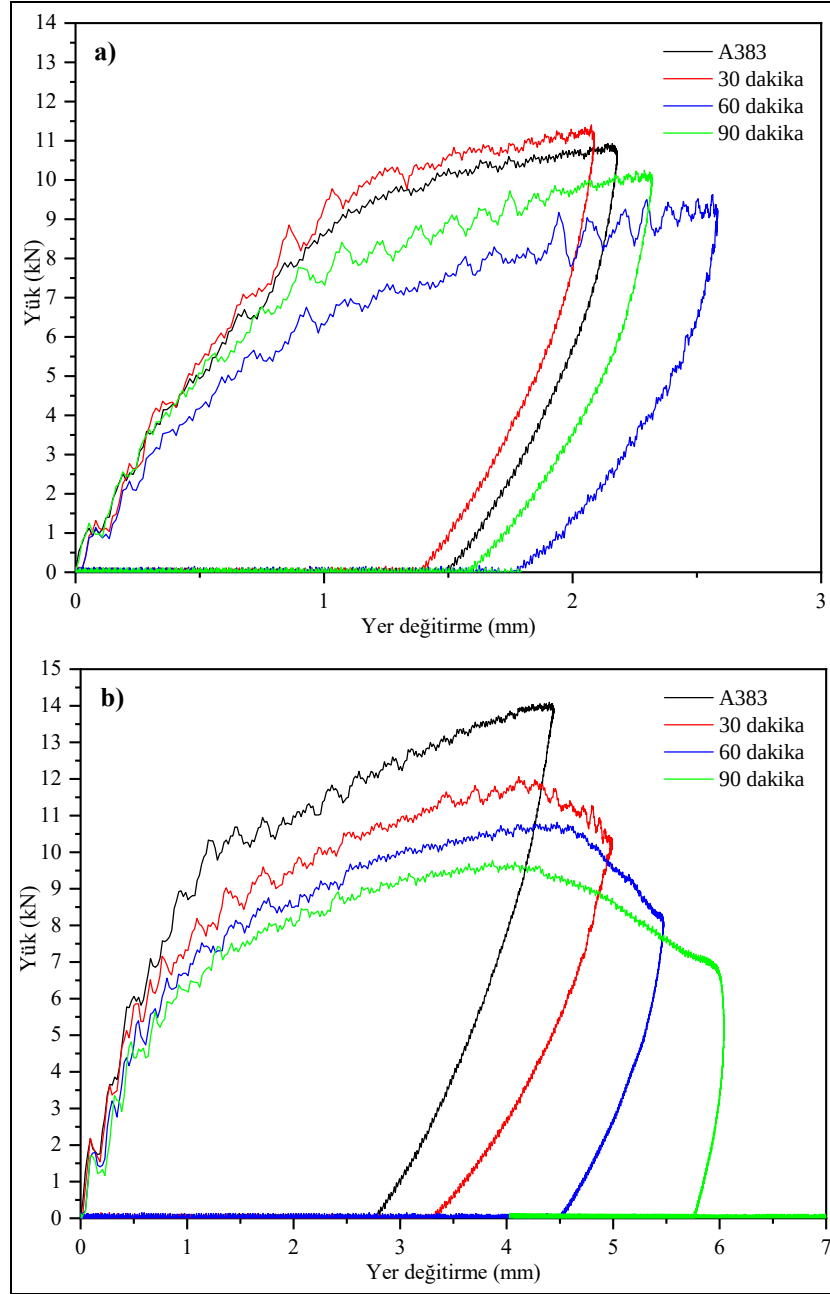
Tablo 8.12: A383 alüminyum alaşımı levha ile 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 15 J ve 45 J darbe enerjileri için elde edilen veriler.

| Malzeme           | Enerji Düzeyi (J) | PEO Kaplama Süresi (dakika) | F <sub>maks</sub> (kN) | E <sub>maks</sub> (J) | d <sub>maks</sub> (mm) | E <sub>s</sub> (J) | Soğurulan Enerji (%) | d <sub>top</sub> (mm) | t <sub>top</sub> (ms) |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| A383              | 15                | -                           | 10,93                  | 16,38                 | 2,14                   | 14,15              | 94,34                | 1,51                  | 5,62                  |
|                   | 45                | -                           | 14,10                  | 45,97                 | 4,40                   | 37,78              | 83,96                | 2,78                  | 7,24                  |
| Kompozit Levhalar | 15                | 30                          | 11,41                  | 16,37                 | 2,08                   | 13,73              | 91,54                | 1,39                  | 5,49                  |
|                   |                   | 60                          | 9,63                   | 16,47                 | 2,56                   | 14,12              | 94,15                | 1,78                  | 6,71                  |
|                   |                   | 90                          | 10,25                  | 16,30                 | 2,29                   | 14,07              | 93,77                | 1,59                  | 6,08                  |
|                   | 45                | 30                          | 12,07                  | 36,40                 | 4,11                   | 39,69              | 88,19                | 3,30                  | 8,48                  |
|                   |                   | 60                          | 10,82                  | 36,73                 | 4,47                   | 43,50              | 96,65                | 3,94                  | 8,69                  |
|                   |                   | 90                          | 9,77                   | 28,09                 | 3,87                   | 45,99              | 102,18               | 5,76                  | 8,67                  |

Şekil 8.38.a)'da gösterilen yük-yer değiştirme grafiklerinde 15 J darbe enerjisinde A383 alüminyum alaşımı levha ve tüm kaplama sürelerinde eğriler

maksimum yük değerlerine ulaştıktan sonra yük eksenini kesecek şekilde geri dönüp yer değiştirme değerinin sıfır olduğu noktaya gelerek kapalı eğriler oluşturmaktadır. Bu kapalı eğriler, darbe testinin geri sekme karakterli olduğunu; kompozit levhanın ön yüzünde nüfuz etme ve delinme durumunun olmadığını göstermektedir. Tüm levhaların ön yüzünde darbe ucunun temas ettiği noktada batma izi, levhaların arka yüzünde makro çatlaklar oluşmaya başlamaktadır (Şekil 8.8a, Şekil 8.9 ve Şekil 8.11). Arka yüzde ilk çatlak oluşumu yaklaşık olarak 5.36 kN yükte 90 dakika kaplama süreli kompozit levhada gerçekleşmektedir ve kaplama süresinin azalması ile hasarın oluşmaya başladığı yük kuvveti artmaktadır. Ancak, çatlak oluşumu başladıktan sonra ilerlemesinin ve dolayısıyla enerji soğurma kapasitesinin en fazla 60 dakika kaplama süreli kompozit levhada olduğu görülmektedir. Darbe testinde levhalar tarafından soğurulan enerji, eğrilerin altındaki alandan hesaplanabilmektedir. A383 alüminyum alaşımı levha ile kompozit levhalar tarafından soğurulan enerji darbe enerjisinden (15 J) daha küçüktür. Kompozit levhalar ile karşılaştırıldığında A383 alüminyum alaşımı levhanın enerji soğurma yüzdesi daha yüksek olmaktadır (Tablo 8.12).

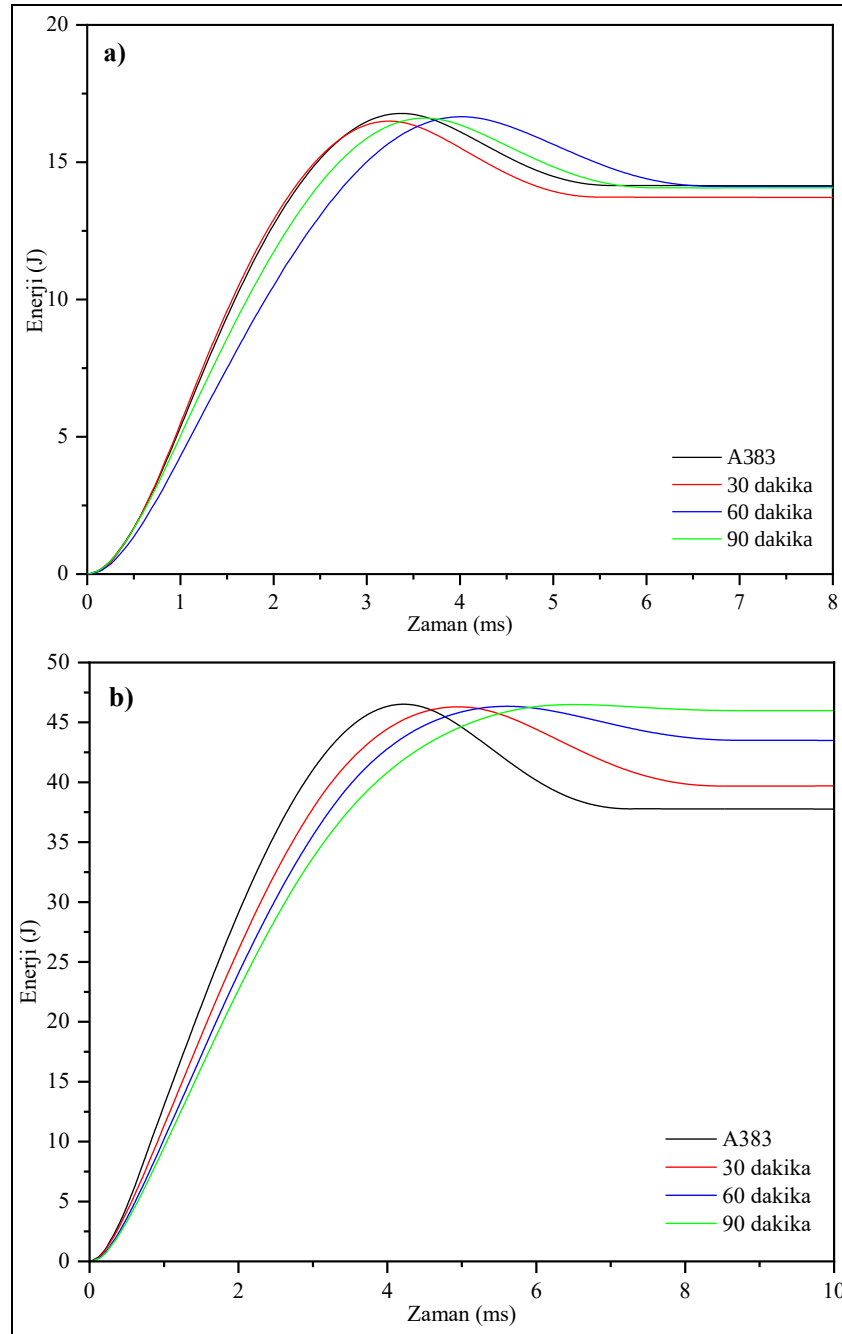
Şekil 8.38b’de 45 J darbe enerjisinde ise 90 dakika kaplama süresi için kapalı eğri oluşmamakta, açık eğri olarak devam etmektedir. Bu durumda kompozit levha tarafından soğurulan enerji darbe enerjisinden büyük olmaktadır. 90 dakika kaplama süreli kompozit levhada geri sekme olmadığı ancak nüfuz etme durumunun ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 8.10c). 30 ve 60 dakika kaplama süreli kompozit levhalarda kapalı eğri oluşmakla birlikte, A383 alüminyum alaşımı levhadan farklı olarak hasara uğramaktadır. Tüm kompozit levhaların ön yüzünde sünek ana fazda çökme biçim değiştirme ile birlikte dairesel çevrede çatlak oluşumu ve ilerlemesi görülmektedir. Kompozit levhaların arka yüzünde ise merkezde oluşan çatlakların boyutu ve uzunluğu artmaktadır (Şekil 8.10). İlk çatlak oluşumu, yaklaşık olarak 5.36 kN yükte ve 90 dakika kaplama süreli kompozit levhada gerçekleşmekte ve kaplama süresinin azalması ile hasarın oluşmaya başladığı yük kuvveti artmaktadır. 90 dakika kaplama süreli kompozit levhada çatlak ilerlemesinin daha uzun olduğu ve dolayısıyla daha fazla kalıcı biçim değiştirmeye maruz kaldığı görülmektedir (Şekil 8.10c). 45 J darbe enerjisinde 90 dakika kaplama süreli kompozit malzemede toplam yer değiştirme miktarı ve dolayısıyla nüfuz etme durumu en fazla olmuştur. 60 dakika kaplama süreli kompozit levha 45 J darbe enerjisinde en fazla enerji soğurmuştur.



Şekil 8.38: 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için yük-yer değiştirme grafikleri.

Şekil 8.39’da A383 alüminyum alaşımı levha ile 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundaki kompozit levhaların 15 J ve 45 J darbe enerjisine karşılık enerji-zaman grafikleri verilmektedir. 15 J darbe enerjisine ait enerji-zaman grafikleri incelendiğinde enerjinin zamanla arttığı ve bir maksimum değere ulaştıktan sonra enerjinin tamamının geri dönmeyerek sabit bir değerde yer değiştirme eksenine paralel olarak hareket ettiği görülmektedir (Şekil 8.39a). Enerji değerinin belirli bir seviyede sabit kalması darbe testi sırasında darbe ucu ile kompozit levha arasındaki sürtünme

kuvvetlerinin devam etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde de bu düşüncemiz paralellik göstermektedir [Yalçın, 2012]. A383 alüminyum alaşımı ve kompozit levhalar tarafından soğurulan enerji miktarı ( $E_s$ ), Şekil 8.39'daki enerji-zaman grafiğinde darbe testinin sonunda tespit edilen enerjiye karşılık gelmektedir. Darbe enerjisi ile soğurulan enerji arasındaki fark, darbe ucunun yön değiştirerek geri sekmesine neden olan elastik şekil değiştirme enerjisinden kaynaklanmaktadır. 15 J darbe enerjisinde tüm levhalar geri sekme karakterli davranmaktadır. 45 J darbe enerjisinde 90 dakika kaplama süreli kompozit levha tarafından soğurulan enerji başlangıç darbe enerjisinden daha büyük olduğu görülmektedir (Şekil 8.39b). Kısmi nüfuz etme durumunun olduğu darbe testlerinde darbe sonunda malzeme tarafından soğurulan enerji maksimum değerine ulaşmakta ve başlangıç darbe enerji düzeyine eşit olmaktadır. 90 dakika kaplama süreli kompozit levhada kısmi nüfuz etme durumu ortaya çıkmıştır.



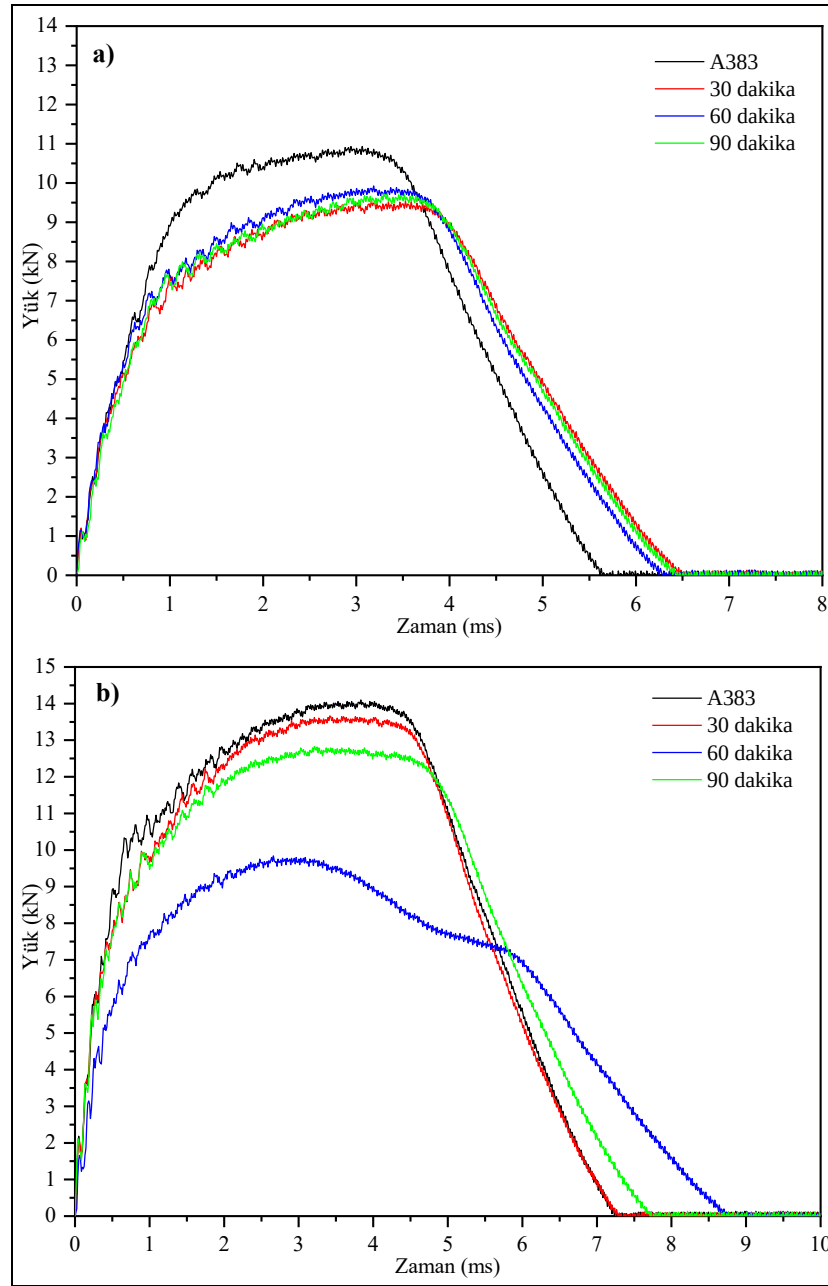
Şekil 8.39: 20 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için enerji-zaman grafikleri.

Şekil 8.40'ta 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundaki kompozit levhanın 15 ve 45 J darbe enerjisine karşılık yük-zaman grafikleri verilmektedir. Yük-zaman grafiğinde yük eğrisinin eğimi 15 J darbe enerjisinde A383 alüminyum alaşımı levha ile karşılaştırıldığında 60 dakika sürede kaplanan kompozit levhada artarken, 60 dakika ve 90 dakika kaplama sürelerinde ise azalmaktadır. 45 J darbe enerjisinde ise 30 dakika ve 90 dakika kaplama süreleri için elde edile eğrilerin eğimi A383 alüminyum alaşımı levha için elde edilen eğrinin eğimi ile karşılaştırıldığında

artmakta, 60 dakika kaplama süresi için azalmaktadır. Darbe enerjisi artırıldığında A383 alüminyum alaşımı levha ile 30 dakika ve 90 dakika kaplama sürelerinde yük değerleri artmakta, 30 dakika kaplama süresinde ise azalmaktadır. 15 darbe enerjisinde ilk hasar 30 dakika kaplama süreli kompozit levhada 4,95 kN yükte oluşmaktadır. Kaplama süresi ile ilk hasarın oluştuğu yük artmaktadır. 45 J darbe enerjisinde ise ilk hasar 60 dakika kaplama süreli kompozit levhada oluşmakta ve maksimum yükten sonra ikincil hasar ortaya çıkmaktadır. Darbe sonrası ön yüzde sünek ana fazda çökme biçim değiştirme ile dairesel çevrede çatlak oluşumu ve ilerlemesi oluşmaktadır. A383 levha ile 30 ve 90 dakika kaplama süreli kompozit levhalarda ön yüzde sadece sünek çökme biçim değiştirme oluşmuştur (Şekil 8.8 ve Şekil 8.11). Tablo 8.13'te 15 J ve 45 J darbe enerjilerinde A383 alüminyum alaşımı levha tüm malzemeler arasında 15 J enerji seviyesinde 10,93 kN maksimum yük değerine, 45 J enerji seviyesinde ise 14,10 kN maksimum yük değerine ulaşılmaktadır. Darbe enerjisi arttıkça toplam test süresi kompozit levhalarda A383 alüminyum alaşımı levhaya göre azalmaktadır. Yük değerleri darbe yükleme sonunda zaman eksenine paralel konuma gelerek sıfırlanmaktadır (Şekil 8.40).

Tablo 8.13: A383 alüminyum alaşımı levha ile 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 15 J ve 45 J darbe enerjileri için elde edilen veriler.

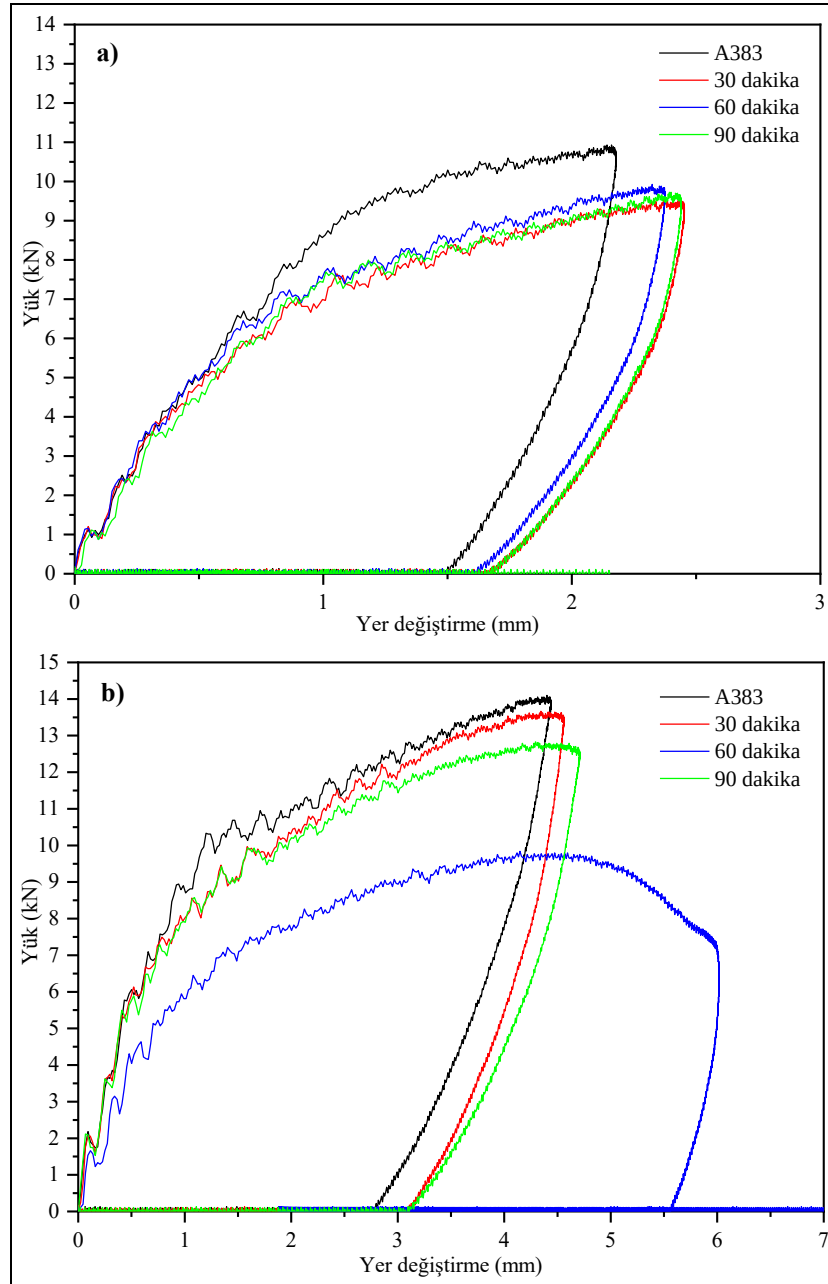
| Malzeme           | Enerji Düzeyi (J) | PEO Kaplama Süresi (dakika) | F <sub>maks</sub> (kN) | E <sub>maks</sub> (J) | d <sub>maks</sub> (mm) | E <sub>s</sub> (J) | Soğurulan Enerji (%) | d <sub>top</sub> (mm) | t <sub>top</sub> (ms) |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| A383              | 15                | -                           | 10,93                  | 16,38                 | 2,14                   | 14,15              | 94,34                | 1,51                  | 5,62                  |
|                   | 45                | -                           | 14,10                  | 45,97                 | 4,40                   | 37,78              | 83,96                | 2,78                  | 7,24                  |
| Kompozit Levhalar | 15                | 30                          | 9,56                   | 15,97                 | 2,37                   | 14,22              | 94,80                | 1,68                  | 6,47                  |
|                   |                   | 60                          | 9,93                   | 16,25                 | 2,32                   | 14,24              | 94,89                | 1,61                  | 6,29                  |
|                   |                   | 90                          | 9,72                   | 16,24                 | 2,39                   | 14,21              | 94,71                | 1,67                  | 6,43                  |
|                   | 45                | 30                          | 13,67                  | 43,10                 | 4,34                   | 39,05              | 86,77                | 3,09                  | 7,29                  |
|                   |                   | 60                          | 9,84                   | 29,87                 | 4,15                   | 45,69              | 101,52               | 5,62                  | 8,75                  |
|                   |                   | 90                          | 12,83                  | 41,05                 | 4,29                   | 39,16              | 86,99                | 3,10                  | 7,71                  |



Şekil 8.40: 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için yük-zaman grafikleri.

Şekil 8.41’de A383 alüminyum alaşımı levha ile 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundaki kompozit levhaların 15 J ve 45 J darbe enerjisine karşılık yük-yer değiştirme grafikleri verilmektedir. Yük-yer değiştirme grafiklerinde 15 J darbe enerjisinde görülen kapalı eğriler (Şekil 8.41a) Şekil 8.43a’daki grafik ile benzerlik göstermektedir. Şekil 8.41b’de 45 J darbe enerjisinde 60 dakika kaplama süresi için kapalı eğri oluşmamakta ve açık eğri olarak devam etmektedir. Bu durumda kompozit levhanın ön yüzünde delinme olmadığı ancak kısmi nüfuz etme durumunun olduğu

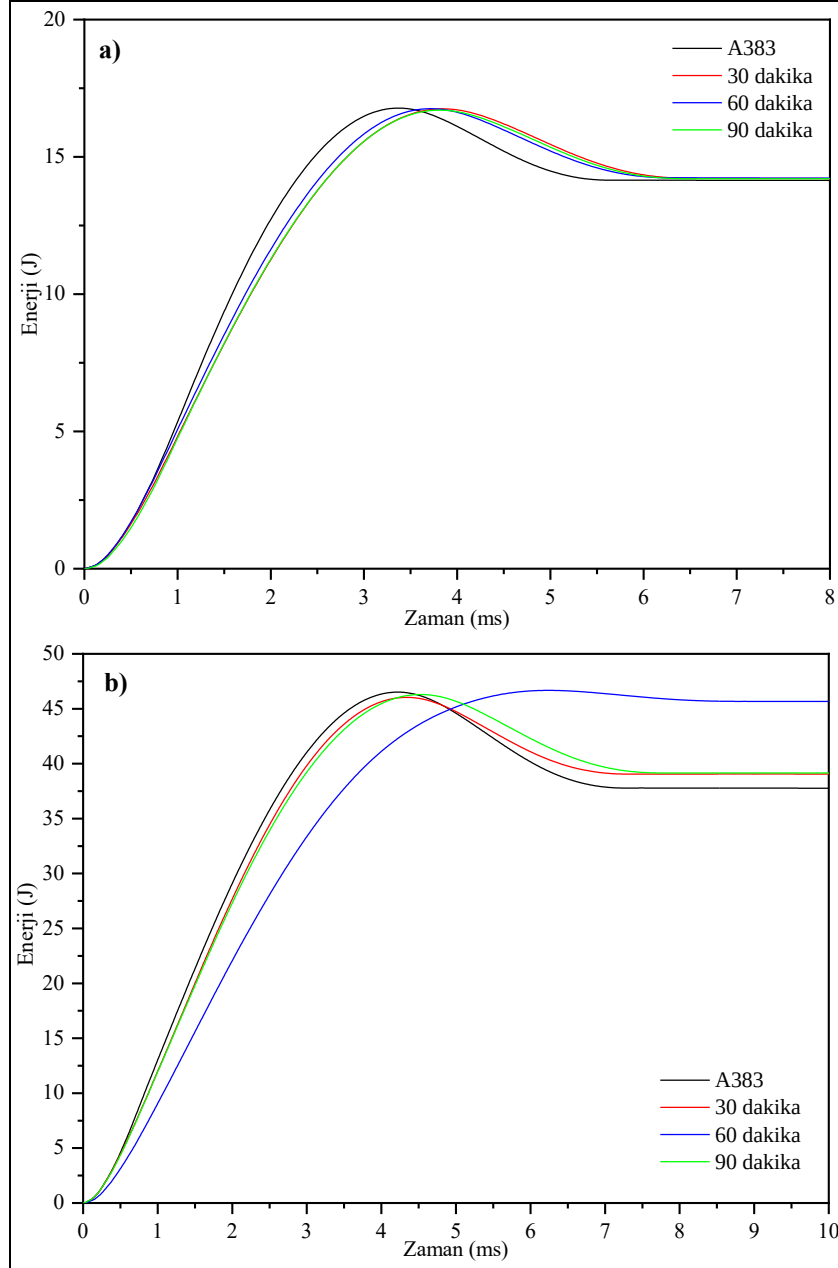
görülmektedir. Levhanın arka yüzünde ise merkezde makro çatlakların boyutu ve uzunluğu artmaktadır (Şekil 8.11b).



Şekil 8.41: 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için yük-yer değiştirme grafikleri.

Şekil 8.42’de A383 alüminyum alaşımı levha ile 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundaki kompozit levhaların 15 J ve 45 J darbe enerjisine karşılık enerji-zaman grafikleri verilmektedir. Şekil 8.42’deki enerji-zaman grafiği incelendiğinde Şekil 8.39’daki grafik ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. 15 J darbe enerjisinde

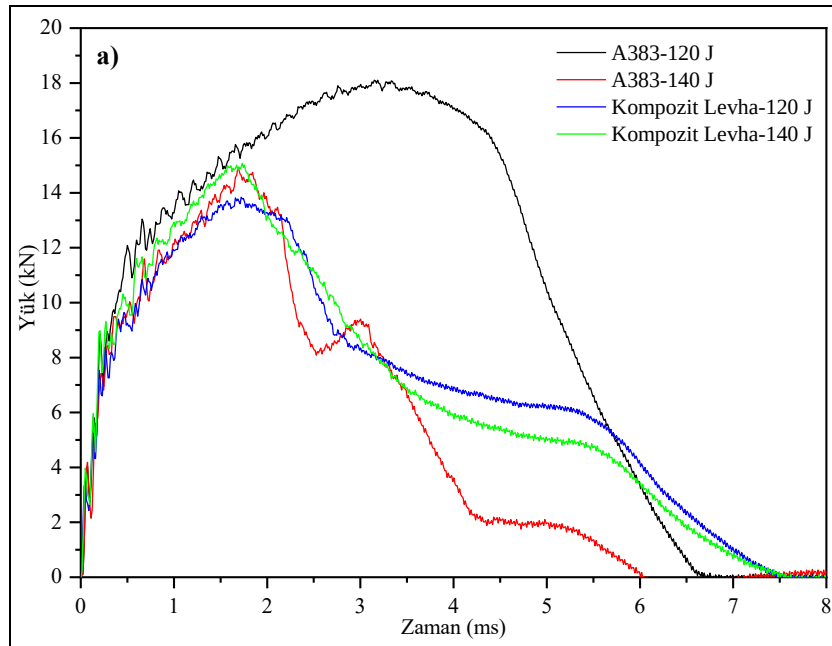
tüm levhalar geri sekmeli karakterli darbe davranışı sergilemektedir. 45 J darbe enerjisinde ise 60 dakika kaplama süreli kompozit malzemede soğurulan enerji başlangıç darbe enerjisine eşit gelmekte ve kısmi nüfuz etme durumu göstermektedir.



Şekil 8.42: 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların a) 15 J ve b) 45 J darbe enerjileri için enerji-zaman grafikleri.

A383 alüminyum alaşımı levha ile 40 ppi gözenek yoğunluğunda 60 dakika süreyle seramik kaplandıktan sonra gözeneklerine A383 alüminyum alaşımının infiltre edilmesiyle üretilen kompozit levhaya ayrıca 120 J ve 140 J enerji düzeylerinde darbe enerjileri uygulanmıştır. Şekil 8.43 ve Şekil 8.44'te yük-zaman ve yük-yer değiştirme

grafiklerinde ilk hasar oluşumu kompozit levhalarda gerçekleşmektedir. Yük-değiştirme grafiğinde tüm levhalar açık eğri oluşturmaktadır. A383 alaşımı levhalar ile kompozit levhalar farklı hasar davranışı sergilemektedir. 120 J darbe enerjisinde A383 alaşımı levhanın ön yüzünde çökme şeklinde sünek biçim değiştirme ile darbe ucunun temas ettiği noktada makro çatlaklar oluşmakta; arka yüzde ise çatlak genişliği ve uzunluğu artmıştır (Şekil 8.13a). Darbe enerjisi 140 J enerji düzeyine artırıldığında ilk hasarın olduğu yük değeri azalmıştır. Maksimum yükten sonra levhada sünek kırılma oluşmakta ve yük biraz azaldıktan sonra tam nüfuz etme durumu ve levhada delinme gerçekleşmektedir (Şekil 8.13b). A383 alaşımı levhada ilk hasar düşük yükleme kuvvetinde oluşmaktadır. Kompozit levhalarda ise ilk hasarın olduğu yük değeri darbe enerjisi ile artmaktadır. Kompozit levhalarda tam nüfuz etme durumu olmasına karşın, delinme gerçekleşmemiştir.



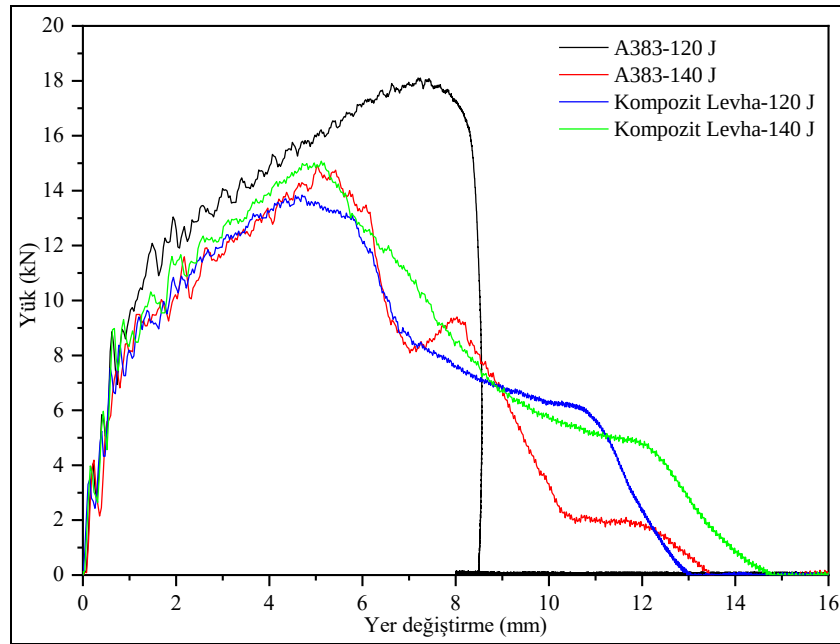
Şekil 8.43: A383 alüminyum alaşımı levha ile kompozit levhaların 120 J ve 140 J darbe enerjileri için yük-zaman grafikleri.

Artan darbe enerjisi ile darbe ucunun levhaya nüfuz ettiği derinlik ve kırılmaya maruz kalan yüzey alanı da artmaktadır. Levhaların arka yüzündeki kırılma alanı uygulanan darbe enerjisinin artmasına bağlı olarak genişlemektedir. Şekil 8.45'te enerji-zaman grafiğinde enerji zamanla sürekli artmaktadır. Buna göre, 120 J ve 140 J darbe enerjilerinde geri sekmeli karakter oluşmamakta, tam nüfuz etme durumu ve A383 alaşımı levhanın delinmesi tespit edilmektedir. Tablo 8.14'te verilen yük

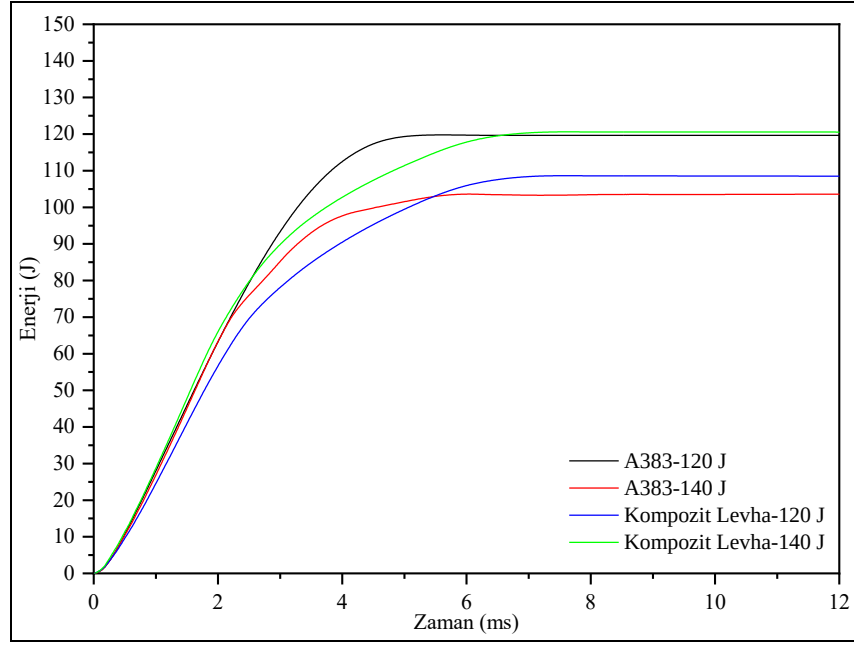
değerlerine bakıldığında artan darbe enerjisi ile yükün arttığı artmıştır. Soğurulan enerji miktarının kompozit levhada 140 J darbe enerjisinde daha yüksek olmaktadır. Toplam yer değiştirme miktarının kompozit levhada (14,67 mm) yüksek olmakta ve çatlak ilerlemesinin nüfuz etme durumunun olmasına karşın delinme hasarının oluşmasını engellemiştir.

Tablo 8.14: A383 alüminyum alaşımı levha ile 40 ppi başlangıç gözenek yoğunluğundan üretilen kompozit levhaların 120 J ve 140 J darbe enerjileri için elde edilen veriler.

| Malzeme           | Enerji Düzeyi (J) | PEO Kaplama Süresi (dakika) | $F_{maks}$ (kN) | $E_{maks}$ (J) | $d_{maks}$ (mm) | $E_s$ (J) | Soğurulan Enerji (%) | $d_{top}$ (mm) | $t_{top}$ (ms) |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------|----------------------|----------------|----------------|
| A383              | 120               | -                           | 18,10           | 97             | 7,19            | 119,64    | 99,68                | 8,49           | 6,68           |
|                   | 140               | -                           | 14,92           | 51,99          | 5,02            | 103,61    | 74                   | 13,41          | 6,01           |
| Kompozit Levhalar | 120               | 60                          | 13,84           | 48,53          | 4,70            | 108,59    | 90,48                | 14,46          | 7,47           |
|                   | 140               | 60                          | 15,08           | 56,75          | 5,12            | 120,60    | 86,14                | 14,67          | 7,48           |



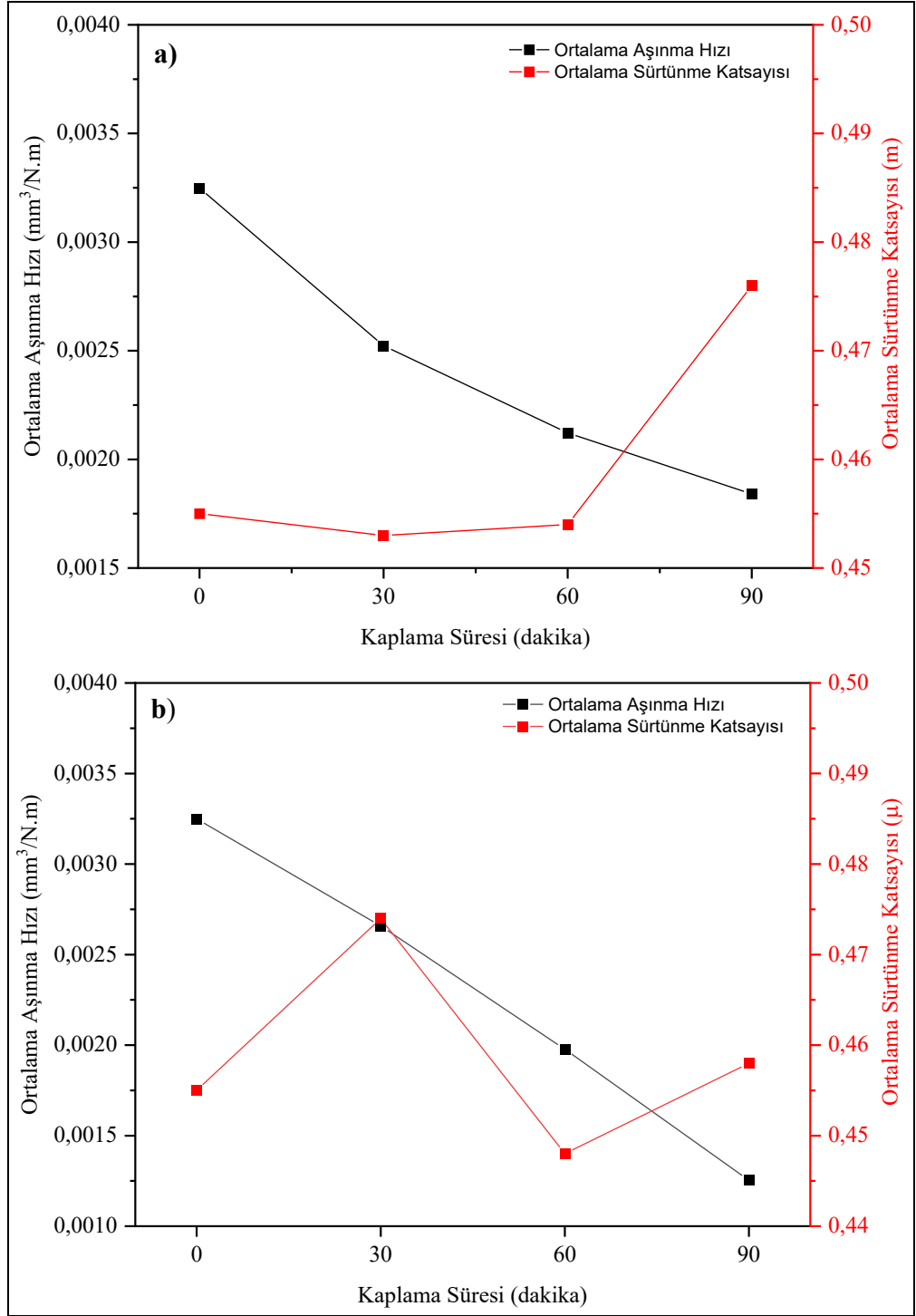
Şekil 8.44: A383 alüminyum alaşımı levha ile kompozit levhaların 120 J ve 140 J darbe enerjileri için yük-yer değiştirme grafikleri.



Şekil 8.45: A383 alüminyum alaşımı levha ile kompozit levhaların 120 J ve 140 J darbe enerjileri için enerji-zaman grafikleri.

#### 8.5.4. Aşınma Test Sonuçları

Şekil 8.46'da üretilen kompozit levhaların kaplama süresine bağlı olarak ortalama aşınma hızı ve ortalama sürtünme katsayısı grafikleri verilmektedir. PEO yöntemi ile seramik kaplanan kompozit levhaların kiriş ağırları aşınma direncini artırmakta ve ortalama aşınma hızını azaltmaktadır. Oluşan seramik kaplamalar faz yapısına göre 20 ppi ve 40 ppi gözenek yoğunluğunda ortalama aşınma hızları eğrisine baktığımızda farklılık gözlenmektedir. 40 ppi gözenek yoğunluğunda ortalama aşınma hızının doğrusal olarak azalması kaplama süresinde mullit, gama alümina ve alfa alümina fazlarının oluşmasından kaynaklanmaktadır. 20 ppi gözenek yoğunluğunda 30 ve 60 dakika kaplama süreleri için kompozit levhalarda ve A383 alüminyum alaşımı levhada ortalama sürtünme katsayısı çok büyük bir değişim göstermezken 90 dakika kaplama süresi için en yüksek değere ulaşmaktadır (Şekil 8.46a) Alümina fazlarının mevcut olması ve kaplama kalınlığının artması kompozit levhalarda 90 dakika kaplama süresi için ortalama sürtünme katsayısının artmasına neden olmaktadır. 40 ppi gözenek yoğunluğunda 60 dakika kaplama süresi için en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerine ulaşılmaktadır (Şekil 8.46b). Bunun nedeni olarak gama alümina fazının azalması ve mullit fazının oluşmasından kaynaklanmaktadır. Sürtünme katsayısını etkileyen faktörlerde malzemenin, kaplamanın bileşimi ve yüzeyde oksit tabakanın oluşması sıralanabilmektedir. Mullit ve gama alümina fazları genellikle katı yağlayıcı olarak görev yaparak sürtünme katsayısını azalttığı bildirilmektedir [Gnedenkova et al., 2000].



Şekil 8.46: A383 alüminyum alaşımı ve üretilen kompozit levhaların a) 20 ppi ve b) 40 ppi gözenek yoğunluklarındaki aşınma davranışı.

## 9. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, ilk aşamada, farklı gözenek yoğunluklarındaki açık gözenekli 6101 ve 6061 alüminyum alaşımı köpüklerin yüzeyinde plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) yöntemi ile seramik oksit fazları oluşturulmuştur. İkinci aşamada, yüzeyi seramik kaplanan köpük yapılara vakum destekli basınçlı döküm yöntemi ile A383 alüminyum alaşımının infiltrasyonu işlemi yapılarak içinde seramik-metal-seramik sandviç benzeri ağsı yapıları içeren metal ana fazlı kompozit levha üretilmiştir. PEO ile seramik kaplanan alüminyum köpükler ve niha olarak üretilen kompozit levhalar için:

- PEO yöntemi ile 6101 ve 6061 alüminyum alaşımları köpüklerin yüzeyinde üretilen kaplamalar, özgün yapısal ögeler olarak yüzey boyunca, mikro gözenek biçiminde dağılmış deşarj kanalları, yumru biçiminde yapılar ve mikro çatlaklar içermektedir. Bu yapısal ögeler tüm kaplama koşulları için elde edilmiştir.
- PEO kaplama süresi ile yüzeyde oluşan özgün yapısal ögelerin boyutu artarken miktarı azalmıştır. PEO işleminden sonra alüminyum köpüklerin gözenek boyutları küçülürken giriş kalınlıkları artmıştır.
- PEO kaplama bölgesi 30 dakika kaplama süresinde tek katmanlı bir mikro yapı gözlenirken, 60 ve 90 dakika kaplama sürelerinde, çok sayıda küçük mikro gözenekli bir iç katman ile görece yoğun (sıkı) ve sayıca az kaba gözenekli bir dış katman şeklinde mikro yapı gözlenmiştir.
- 6061 alüminyum alaşımı köpük malzemelerin yüzeylerinde oluşan kaplamaların 6101 alüminyum alaşımı köpük malzemelerin yüzeyinde oluşan kaplamalara göre daha fazla sayıda mikro gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.
- Kaplama kalınlığı, 20 ppi gözenek yoğunluğundaki köpükler için kaplama süresi ile artmıştır. 40 ppi gözenek yoğunluğundaki köpüklerde ise 30 ve 60 dakika kaplama sürelerinde artmış, 90 dakika kaplama süresinde azalmıştır.
- Deşarj kanalları çevresinde yapılan EDS analizlerinde Al ve O elementlerinin nicel oranları yüksek olarak ölçülmüştür. Si elementinin nicel oranı yumrulu yapılarda yüksek, deşarj kanalları çevresinde ise düşük olarak ölçülmüştür. Yumrulu yapıların XRD analizinde tespit edilen mullit fazı olarak tespit edilmiştir.

Deşarj kanalları çevresindeki krater yapılarında alfa alümina ve gama alümina fazları yoğun olarak bulunmuştur.

- XRD analiz sonuçlarına göre sodyum silikat esaslı çözelti içerisinde üretilen PEO kaplamaların yüzeylerinde gama alümina ( $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), alfa alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), mullit ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ) fazları ve altlık alüminyum köpükten gelen Al fazı tespit edilmiştir.
- Her iki alaşım türü için kaplamasız alüminyum alaşımı köpük ile karşılaştırıldığında PEO işleminden sonra özgül ağırlık değerleri artmış; gözeneklilik oranları ise azalmıştır.
- 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alüminyum alaşımı köpükte 90 dakika kaplama süresinde dönüşüm oranı yaklaşık %19 olarak; 40 ppi gözenek yoğunluğundaki 6061 alüminyum alaşımı köpükte ise 90 dakika kaplama süresinde dönüşüm oranı yaklaşık %22 olarak dönüşümün gerçekleştiği görülmüştür.
- Seramik kaplanan alüminyum alaşımı köpükler bir başlangıç doğrusal elastik (yarı-elastik deformasyon) bölge, genişletilmiş bir plato (durağan) bölgesi ve son olarak yoğunlaşma (sıkıştırma) bölgesini içeren, sünek metal köpük basma gerilme-gerinme eğrisine benzer bir eğri sergilemiştir.
- 20 ppi gözenek yoğunluğundaki seramik kaplanan köpüklerin basma mukavemet değerlerindeki artış, 40 ppi gözenek yoğunluğundaki seramik kaplanan köpüklerden daha fazla olduğu görülmüştür. 40 ppi gözenek yoğunluğundaki seramik kaplanan köpüklerde metal/seramik dönüşüm oranının yüksek olması, alüminyum kirışlerin seramik karakterde davranış sergilemesine ve gevrek kırılmaya neden olarak basma mukavemet değerlerindeki artışı sınırlamıştır.
- 20 ppi gözenek yoğunluğundaki 6101 alüminyum alaşımı köpüğün 30 dakika süreyle kaplanmasından sonra uygulanan basma testinden elde edilen ortalama özgül mukavemet değeri  $10,5 \text{ MPa}/(\text{g}/\text{cm}^3)$  olarak hesaplanarak, kaplamasız alüminyum köpüğe oranla %81 artış tespit edilmiştir.
- A383 alüminyum alaşımının vakum destekli basınçlı döküm ile seramik kaplanan 6061 alüminyum alaşımı köpüklere infiltrasyonu sonucu üretilen kompozit levhaların ara kesit yapısına ait SEM görüntülerinde, A383 alüminyum alaşımının seramik kaplanan köpüğün açık gözeneklerine infiltre edildiği görülmüştür.
- Üretilen kompozit levhalar mikro-CT ile derinlemesine incelendiğinde A383 alüminyum alaşımının tüm PEO ile seramik kaplanan gözenekli köpüklere nüfuz

ettiği ancak bazı numunelerin kenar bölgelerinde seramik kaplanan gözenekli yapılara kısmen nüfuz etmediği görülmüştür.

- Nihai üretilen kompozit levhaların eğilme mukavemet değerleri A383 alüminyum alaşımının eğilme mukavemeti (346 MPa) değerine göre azalmıştır. PEO işlem süresi ile kaplama kalınlığı arttıkça, uzun işlem süreleri için alüminyum kirişin seramik kaplamaya dönüşüm oranı daha yüksek olmuştur. Bu nedenle, alüminyum kiriş gevrek davranış sergileyerek, kirişin eğilme momentinin azalmasına neden olmuştur.

- Kompozit levhalar, eğme yüklemesi eksenine normal olarak meydana gelen, makroskobik bir ölçekte sünek ve kırılğan kırılma mekanizmalarını anımsatan kırık yüzey görünümleri sergilemiştir. A383 alüminyum alaşımı levhanın alt yüzey makro görüntüsüne bakıldığında sünek bir malzemenin kırılma yüzeyine (yırılma sırtları ve mikroskobik boşluklar içeren gamzeli kopma) sahip olduğu görülmüştür. Kompozit levhaların alt yüzey makro görüntüsünde ise kırılma mekanizmasının ana fazdan PEO kaplamanın ayrılması ile gerçekleştiği görülmüştür.

- 15 J darbe enerjisinde sadece ön yüzde darbe ucunun batma izi ve arka yüzde kaplama-ana faz arayüzeyi boyunca gevrek çatlak oluşumlarının kompozit levhalarda ana hasar mekanizması olarak ortaya çıktığı; artan darbe enerjisi düzeyi ile (45 J) hasar mekanizmasının batma izi çevresinde kaplama-ana faz arayüzeyi boyunca gevrek çatlak oluşumu ve dairesel olarak ilerlemesi, arka yüzde ise çatlak boyutu ve uzunluğunda artma şeklinde saptanmıştır.

- Darbe enerji düzeyi 140 J düzeyine artırıldığında A383 alüminyum alaşımı levhada delinme hasarı gerçekleşmekte iken; kompozit levhada çatlak ilerlemesinin A383 ana faz ile PEO kaplama ara yüzeyinde ilerlemesi, yön değiştirerek sapması ve enerjinin ara yüzeyin ayrılmasına harcanması nedeniyle daha iyi darbe direnci göstermiştir.

- PEO yöntemi ile seramik kaplandıktan sonra A383 alüminyum alaşımının infiltrasyonu sonucunda üretilen kompozit levhaların mikro yapısındaki kiriş ağları aşınma direncini artırarak ortalama aşınma hızını azaltmıştır.

## 10. ÖNERİLER

Bu tez kapsamına dahil olmayan aşağıda verilen öneriler ileride yapılacak çalışmalarda uygulanabilir:

- Bu tez çalışması kapsamında üretilen kompozit levhaların yüzeylerinde PEO yöntemi ile sert seramik esaslı bir katman oluşturularak; yüzeylerde seramik katman ve çekirdek yapıda kompozit levha içeren seramik kompozit zırh sistemi üretimi yapılabilir.
- Alüminyum köpüklerin PEO yöntemi ile kaplanmasından sonra elde edilen seramik kaplamalı köpük yapıya polimer esaslı malzemelerin infiltrasyonu yapılarak kompozit malzeme üretimi yapılabilir.
- PEO yöntemi ile seramik kaplanan köpük yapıların alt ve üst yüzeylerine alüminyum plaka yapıştırılarak sandviç panel üretimi yapılabilir.
- Seramik kaplamalı köpük yapıya polimer esaslı bir malzemenin infiltre edilmesi ile elde edilen kompozit malzemenin alt ve üst yüzeylerine alüminyum plaka yapıştırılarak sandviç panel üretimi yapılabilir.
- Bu tez çalışması kapsamında üretilen kompozit levhalara ve yukarıda önerilen kompozit zırh sistemi ile sandviç panellere balistik test yapılarak yüksek hızlı darbe etkisi altındaki davranışları incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- Abdulla T., Yerokhin A., Goodall R., (2011), "Effect of Plasma Electrolytic Oxidation coating on the specific strength of open-cell aluminium foams", *Materials & Design*, 32 (7), 3742-3749.
- Abdulla T., Yerokhin A., Goodall R., (2014), "Enhancement in specific strength of open cell aluminium foams through plasma electrolytic oxidation treatment", *Scripta Materialia*, 75 38-41.
- Aghajanian M., Rocazella M., Burke J. T., Keck S., (1991), "The fabrication of metal matrix composites by a pressureless infiltration technique", *Journal of Materials Science*, 26 (2), 447-454.
- Alizadeh M., Mirzaei-Aliabadi M., (2012), "Compressive properties and energy absorption behavior of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite foam synthesized by space-holder technique", *Materials & Design*, 35 419-424.
- Antenucci A., Guarino S., Tagliaferri V., Ucciardello N., (2014), "Improvement of the mechanical and thermal characteristics of open cell aluminum foams by the electrodeposition of Cu", *Materials & Design*, 59 124-129.
- Antenucci A., Guarino S., Tagliaferri V., Ucciardello N., (2015), "Electro-deposition of graphene on aluminium open cell metal foams", *Materials & Design*, 71 78-84.
- Ashby M. F., (2006), "The properties of foams and lattices", *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 364 (1838), 15-30.
- Ashby M. F., Evans T., Fleck N. A., Hutchinson J., Wadley H., Gibson L., (2000), "Metal foams: a design guide", Elsevier.
- Ashby M. F., Gibson L. J., (1997), "Cellular solids: structure and properties", Cambridge, UK: Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Bahti H., Habibolahzadeh A., (2010), "Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters", *Materials & Design*, 31 (9), 4122-4129.
- Banhart J., (2001), "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", *Progress in materials Science*, 46 (6), 559-632.
- Bele E., Bouwhuis B. A., Codd C., Hibbard G. D., (2011), "Structural ceramic coatings in composite microtruss cellular materials", *Acta Materialia*, 59 (15), 6145-6154.
- Boonyongmaneerat Y., Schuh C., Dunand D., (2008), "Mechanical properties of reticulated aluminum foams with electrodeposited Ni-W coatings", *Scripta Materialia*, 59 (3), 336-339.

Bouwhuis B. A., McCrea J. L., Palumbo G., Hibbard G. D., (2009), "Mechanical properties of hybrid nanocrystalline metal foams", *Acta Materialia*, 57 (14), 4046-4053.

Brown J. A., Vendra L. J., Rabiei A., (2010), "Bending properties of Al-steel and steel-steel composite metal foams", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41 (11), 2784-2793.

BS EN ISO, (2005), *Metallic materials - Bend test*, BS EN ISO 7438, British Standards Institution, European Committee for Standardization and The International Organization for Standardization.

BS ISO, (2011), *Mechanical testing of metals - Ductility testing - Compression test for porous and cellular metals*, BS ISO 13314, British Standards Institution and the International Organization for Standardization.

Cavuslu F., Korkmaz K., Usta M., (2019), "Mechanical properties of aluminum foams ceramic coated through plasma electrolytic oxidation", *Kovove Mater*, 57 (2), 105-111.

Curran J. A., Clyne T. W., (2006), "Porosity in plasma electrolytic oxide coatings", *Acta Materialia*, 54 (7), 1985-1993.

Curran J. A., Clyne T. W., (2005), "Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium", *Surf Coat Tech*, 199 (2-3), 168-176.

Davies G., Olsson R., (2004), "Impact on composite structures", *The Aeronautical Journal*, 108 (1089), 541-563.

Davies G. J., Zhen S., (1983), "Metallic foams: their production, properties and applications", *Journal of Materials Science*, 18 (7), 1899-1911.

Dehnavi V., Liu X. Y., Luan B. L., Shoesmith D. W., Rohani S., (2014), "Phase transformation in plasma electrolytic oxidation coatings on 6061 aluminum alloy", *Surface and Coatings Technology*, 251 106-114.

Despois J. F., Mortensen A., (2005), "Permeability of open-pore microcellular materials", *Acta Materialia*, 53 (5), 1381-1388.

Dunleavy C. S., Curran J. A., Clyne T. W., (2011), "Plasma electrolytic oxidation of aluminium networks to form a metal-cored ceramic composite hybrid material", *Composites Science and Technology*, 71 (6), 908-915.

Web 1, (2021), <http://ergaerospace.com/>, (Erişim Tarihi: 01/08/2021).

Gallas M. R., Piermarini G. J., (1994), "Bulk Modulus and Young's Modulus of Nanocrystalline  $\gamma$ -Alumina", *J Am Ceram Soc*, 77 (11), 2917-2920.

Ghomashchi M., Vikhrov A., (2000), "Squeeze casting: an overview", *Journal of Materials Processing Technology*, 101 (1-3), 1-9.

Gibson L., (2000), "Mechanical behavior of metallic foams", Annual review of materials science, 30 (1), 191-227.

Gnedenkov S., Khrisanfova O., Zavidnaya A., Sinebryukhov S., Kovryanov A., Gordienko P., (2000), "Wear-and heat-resistant coatings on aluminum surface", Russian Journal of Applied Chemistry, 73 (4), 575-581.

Goodall R., (2013), "Porous metals: foams and sponges", 273-307.

Goodall R., Mortensen A., (2014), "Porous metals". In, "Physical metallurgy", Elsevier.

Gu W.-C., Lv G.-H., Chen H., Chen G.-L., Feng W.-R., Yang S.-Z., (2007), "Characterisation of ceramic coatings produced by plasma electrolytic oxidation of aluminum alloy", Materials Science and Engineering: A, 447 (1-2), 158-162.

Han-Hua W., Zeng-Sun J., Bei-Yu L., Feng-Rong Y., Xian-Yi L., (2003), "Characterization of microarc oxidation process on aluminium alloy", Chinese physics letters, 20 (10), 1815.

Han F., Cheng H., Wang J., Wang Q., (2004), "Effect of pore combination on the mechanical properties of an open cell aluminum foam", Scripta Materialia, 50 (1), 13-17.

Jiang B., Wang Z., Zhao N., (2007), "Effect of pore size and relative density on the mechanical properties of open cell aluminum foams", Scripta Materialia, 56 (2), 169-172.

Jiang B., Zhao N., Shi C., Li J., (2005), "Processing of open cell aluminum foams with tailored porous morphology", Scripta Materialia, 53 (6), 781-785.

Jinnapat A., Kennedy A., (2010), "The manufacture of spherical salt beads and their use as dissolvable templates for the production of cellular solids via a powder metallurgy route", Journal of Alloys and Compounds, 499 (1), 43-47.

Jung A., Diebels S., Koblishka-Veneva A., Schmauch J., Barnoush A., Koblishka M. R., (2014), "Microstructural Analysis of Electrochemical Coated Open-Cell Metal Foams by EBSD and Nanoindentation", Advanced Engineering Materials, 16 (1), 15-20.

Kalkanlı A., Yılmaz S., (2008), "Synthesis and characterization of aluminum alloy 7075 reinforced with silicon carbide particulates", Materials & Design, 29 (4), 775-780.

Korkmaz K., (2015), "The effect of Micro-arc Oxidation treatment on the microstructure and properties of open cell Ti6Al4V alloy foams", Surf Coat Tech, 272 72-78.

Li Z., Zheng Z., Yu J., (2012), “Low-velocity perforation behavior of composite sandwich panels with aluminum foam core”, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 15 (1), 92-109.

Li Z. D., Huang Y. J., Wang X. F., Wang X. F., Han F. S., (2016), “Reinforcing Open Cell Aluminum Foams by Amorphous Ni-P Coating”, *Materials Science Forum*, 879 684-689.

Liu A. F., (2005), “Mechanics and mechanisms of fracture: an introduction”, ASM International.

Liu D., Raju B. B., Dang X., (2000), “Impact perforation resistance of laminated and assembled composite plates”, *International Journal of Impact Engineering*, 24 (6-7), 733-746.

Liu J., Zhu X., Huang Z., Yu S., Yang X., (2011), “Characterization and property of microarc oxidation coatings on open-cell aluminum foams”, *Journal of Coatings Technology and Research*, 9 (3), 357-363.

McPherson R., (1973), “Formation of metastable phases in flame-and plasma-prepared alumina”, *Journal of Materials Science*, 8 (6), 851-858.

Medraj M., Baril E., Loya V., Lefebvre L. P., (2007), “The effect of microstructure on the permeability of metallic foams”, *Journal of Materials Science*, 42 (12), 4372-4383.

Michailidis N., Stergioudi F., Omar H., Tsipas D. N., (2008), “Investigation of the mechanical behavior of open-cell Ni foams by experimental and FEM procedures”, *Advanced Engineering Materials*, 10 (12), 1122-1126.

Mohan K., Yip T. H., Idapalapati S., Chen Z., (2011), “Impact response of aluminum foam core sandwich structures”, *Materials Science and Engineering: A*, 529 94-101.

Mohammed R., Ahmed A., Elgalib M. A., Ali H., (2014), “Low velocity impact properties of foam sandwich composites: a brief review”, *Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol*, 3 579-591.

MUNRO M., (1997), “Evaluated Material Properties for a Sintered alpha-Alumina”, *J Am Ceram Soc*, 80 (8), 1919-1928.

Nieh T., Higashi K., Wadsworth J., (2000), “Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams”, *Materials Science and Engineering: A*, 283 (1-2), 105-110.

Niu W., Bai C., Qiu G., Wang Q., (2009), “Processing and properties of porous titanium using space holder technique”, *Materials Science and Engineering: A*, 506 (1-2), 148-151.

Niu X., Hu B., Pinwill I., Li H., (2000), “Vacuum assisted high pressure die casting of aluminium alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 105 (1-2), 119-127.

Osendi M., Baudin C., (1996), “Mechanical properties of mullite materials”, *Journal of the European Ceramic society*, 16 (2), 217-224.

Polat A., Makaraci M., Usta M., (2010), “Influence of sodium silicate concentration on structural and tribological properties of microarc oxidation coatings on 2017A aluminum alloy substrate”, *Journal of Alloys and Compounds*, 504 (2), 519-526.

Pollien A., Conde Y., Pambaguian L., Mortensen A., (2005), “Graded open-cell aluminium foam core sandwich beams”, *Materials Science and Engineering: A*, 404 (1-2), 9-18.

Prasad D. S., Shoba C., Ramanaiah N., (2014), “Investigations on mechanical properties of aluminum hybrid composites”, *Journal of Materials Research and Technology*, 3 (1), 79-85.

Ramaswamy P., Seetharamu S., Rao K., Varma K., (1998), “Thermal shock characteristics of plasma sprayed mullite coatings”, *Journal of thermal spray technology*, 7 (4), 497-504.

Richardson M., Wisheart M., (1996), “Review of low-velocity impact properties of composite materials”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27 (12), 1123-1131.

Schüler P., Fischer S. F., Bührig-Polaczek A., Fleck C., (2013), “Deformation and failure behaviour of open cell Al foams under quasistatic and impact loading”, *Materials Science and Engineering: A*, 587 250-261.

Sharma A., Jang Y.-J., Jung J. P., (2017), “Effect of KOH to Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ratio on microstructure and hardness of plasma electrolytic oxidation coatings on AA 6061 alloy”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26 (10), 5032-5042.

Stergioudi F., Vogiatzis C. A., Gkrekos K., Michailidis N., Skolianos S. M., (2015), “Electrochemical corrosion evaluation of pure, carbon-coated and anodized Al foams”, *Corrosion Science*, 91 151-159.

Su M., Wang H., Hao H., (2019), “Compressive Properties of Aluminum Matrix Syntactic Foams Prepared by Stir Casting Method”, *Advanced Engineering Materials*, 21 (8), 1900183.

Sun Y., Burgueño R., Vanderklok A. J., Tekalur S. A., Wang W., Lee I., (2014), “Compressive behavior of aluminum/copper hybrid foams under high strain rate loading”, *Materials Science and Engineering: A*, 592 111-120.

Vendra L. J., Rabiei A., (2007), “A study on aluminum–steel composite metal foam processed by casting”, *Materials Science and Engineering: A*, 465 (1-2), 59-67.

Vicario I., Crespo I., Plaza L., Caballero P., Idoiaga I., (2016), “Aluminium Foam and Magnesium Compound Casting Produced by High-Pressure Die Casting”, *Metals*, 6 (1), 24.

Wang Q., Cui C., Liu S., Zhao L., (2010), "Open-celled porous Cu prepared by replication of NaCl space-holders", *Materials Science and Engineering: A*, 527 (4-5), 1275-1278.

Wang W., Burgueño R., Hong J.-W., Lee I., (2013), "Nano-deposition on 3-D open-cell aluminum foam materials for improved energy absorption capacity", *Materials Science and Engineering: A*, 572 75-82.

Wang Z., Ma H., Zhao L., Yang G., (2006), "Studies on the dynamic compressive properties of open-cell aluminum alloy foams", *Scripta Materialia*, 54 (1), 83-87.

Xin S.-G., Song L.-X., Zhao R.-G., Hu X.-F., (2006), "Composition and thermal properties of the coating containing mullite and alumina", *Materials Chemistry and Physics*, 97 (1), 132-136.

Xue W., Deng Z., Chen R., Zhang T., (2000), "Growth regularity of ceramic coatings formed by microarc oxidation on Al-Cu-Mg alloy", *Thin solid films*, 372 (1-2), 114-117.

Xue W., Deng Z., Chen R., Zhang T., Ma H., (2001), "Microstructure and properties of ceramic coatings produced on 2024 aluminum alloy by microarc oxidation", *Journal of materials science*, 36 (11), 2615-2619.

Yalçın E. B., (2012), "Farklı kumaş ve farklı yöntemlerle üretilmiş CTP kompozitlerin balistik davranışlarının incelenmesi", *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi*.

Yamada Y., Shimojima K., Sakaguchi Y., Mabuchi M., Nakamura M., Asahina T., Mukai T., Kanahashi H., Higashi K., (2000), "Processing of Cellular Magnesium Materials", *Advanced Engineering Materials*, 2 (4), 184-187.

Yan Y. Y., Sun J. F., Han Y., Li D. C., Cui K., (2010), "Microstructure and bioactivity of Ca, P and Sr doped TiO<sub>2</sub> coating formed on porous titanium by micro-arc oxidation", *Surf Coat Tech*, 205 (6), 1702-1713.

Yerokhin A., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowey S., (1999), "Plasma electrolysis for surface engineering", *Surface and coatings technology*, 122 (2-3), 73-93.

Zaman E., Keles O., (2014), "Open cell aluminum foams produced by polymer impregnation method", *Acta Phys. Pol. A*, 125 445-448.

Zhang L., Zhao Y., (2007), "Mechanical response of Al matrix syntactic foams produced by pressure infiltration casting", *Journal of Composite Materials*, 41 (17), 2105-2117.

Zhao Y., Sun D., (2001), "A novel sintering-dissolution process for manufacturing Al foams", *Scripta materialia*, 44 (1), 105-110.

## ÖZGEÇMİŞ

Fatih ÇAVUŞLU, orta öğretimini 1995-1999 eğitim-öğretim yıllarında Kadir Has Lisesi'nde tamamladı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde başladığı lisans eğitimini 2003 yılında tamamladı. 2003-2004 yılları arasında Kürüm Demir AŞ'de İşletme Mühendisi olarak çalışmıştır. 2005 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında başladığı yüksek lisans eğitimini 2007 yılında tamamladı. 2008 yılında Yeditepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalında başladığı yüksek lisans eğitimini 2010 yılında tamamladı. 2011 yılında Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. 2013 yılından itibaren Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

## **EKLER**

### **Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar**

Cavuslu F., Korkmaz K., Usta M., (2019), “Mechanical properties of aluminum foams ceramic coated through plasma electrolytic oxidation”, *Kovove Mater*, 57 (2), 105-111.

Çavuşlu F., Korkmaz K., Usta M., (2018). “Pressure Die Infiltration of Aluminum Into Plasma Electrolytic Oxidation Coated Open-Cell Aluminum Foams”, 19th International Metallurgy and Materials Congress (IMMC’2018), TÜYAP Fair, Convention Congress Center, İstanbul, Turkey, 29 September. - 01 October.

Çavuşlu F., Korkmaz K., Usta M., (2017), “Microstructural and Mechanical Properties of Ceramic Coated Open-cell Aluminum Foams Through Plasma Electrolytic Oxidation”, The 3<sup>rd</sup> International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition, Kuşadası, İzmir, Turkey, September 15-18.